



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NEKONVENČNÍ METODY MĚŘENÍ PROUDU A NAPĚTÍ

NON-STANDARD METHODS OF CURRENT AND VOLTAGE MEASUREMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Talába

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Michal Talába

ID: 146976

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Nekonvenční metody měření proudu a napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce jsou teoretické rozborů možností měření proudu a napětí s použitím konvenčních a nekonvenčních metod s důrazem na nové technologie a možnost využití firmou ABB. Praktická část zahrnuje vytvoření proudového senzoru na principu magnetorezistivního materiálu. Proudový senzor bude přizpůsoben a testován pro využití ve vysokonapěťovém rozvaděči ABB. Budou změřeny charakteristiky, vyhodnoceny důležité parametry a porovnány se současnými technologiemi používanými v ABB. Práce bude prováděna pod vedením Ing. Miroslava Hrabčíka, Ph.D. z firmy ABB.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miroslav Hrabčík, Ph.D., ABB s.r.o.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Experimentální část této diplomové práce byla podpořena výzkumnou infrastrukturou
vybudovanou v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá rešeršou nekonvenčných metód merania prúdu a napätia a následným zostrojením prototypu prúdového senzora na báze magnetorezistívneho materiálu pre vysokonapäťový rozvádzač firmy ABB. Výstupom rešerše je popis jednotlivých metód z hľadiska fyzikálneho a z hľadiska spôsobu merania. Výstupom praktickej časti je prúdový senzor osadený magnetorezistívnou súčiastkou schopný merať magnetické pole v okolí vodiča cez ktorý preteká primárny prúd a tým určiť veľkosť primárneho prúdu. Senzor bol meraný v rozsahu 0 až 1000 A, pričom dosahoval hodnoty presnosti a linearity približne 6%. Hlavným prínosom práce je potvrdenie funkčnosti nekonvenčnej metódy pre meranie vysokých prúdov. Na základe výsledkov má firma ABB možnosť rozhodnutia, či je daná technológia perspektívna pre jej produktové portfólio.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nekonvenčné metódy merania, napätie, prúd, prúdový senzor, magnetorezistivita

ABSTRACT

This work brings a study about non-conventional methods of voltage and current measurement, followed by a creation of magneto-resistive material based current sensor prototype, suitable for medium voltage switchgear from ABB. Outcome of the study is description of physical principle and the measurement principle of non-conventional methods. Outcome of the experimental part is a current sensor based on magneto-resistive component, which can measure magnetic field generated around a wire with flowing primary current. Through the magnetic field, the sensor can measure primary current flowing in the wire. Sensor was measured in range 0 – 1000 A, and its accuracy and linearity was approximately 6%. The main contribution of this work is the confirmation that this non-conventional method works for measurement of high currents. Based on the outcome, ABB can decide whether is this technology suitable for its product portfolio.

KEYWORDS

Non-conventional methods of measuring, voltage, current, current sensor, magnetoresistivity

TALÁBA, M. Nekonvenční metody měření proudu a napětí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. 104s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D. Konzultant práce: Ing. Miroslav Hrabčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Nekonvenční metody měření proudu a napětí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Týmto smerom by som sa rád poďakoval všetkým, ktorí prispeli k tomu, aby mohla táto diplomová práca vzniknúť. Predovšetkým môjmu konzultantovi, Ing. Miroslavovi Hrabčíkovi, Ph. D. za odbornú pomoc a Ing. Janovi Švindrychovi, za pomoc pri meraní. Ďalej by som sa rád poďakoval Ing. Janovi Žamberskému, Mgr. Jurajovi Pálenikovi a Ing. Zuzane Talábovej za podporu pri písaní práce.

V Brně dne

.....

OBSAH

Úvod	10
1 Nekonvenčné metódy merania prúdu	11
1.1 Magnetizmus.....	11
1.1.1 Biot-Savartov zákon	12
1.1.2 Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere.....	13
1.2 Hallova sonda	14
1.2.1 Fyzikálny princíp	14
1.2.2 Meranie	16
1.3 Optické metódy.....	20
1.3.1 Fyzikálny princíp	20
1.3.2 Meranie	21
1.4 Piezoelektrické a optické senzory v MEMS obvodoch	25
1.4.1 Fyzikálny princíp	25
1.4.2 Meranie	26
1.5 Saturačná cievka	27
1.5.1 Fyzikálny princíp	27
1.5.2 Meranie	29
1.6 Magnetorezistívny prúdový senzor.....	30
1.6.1 Fyzikálny princíp	30
1.6.2 Meranie	34
2 Nekonvenčné metódy merania napätia	37
2.1 Piezoelektrický napäťový senzor.....	37
2.1.1 Fyzikálny princíp	37
2.1.2 Meranie	37
2.2 Optické metódy merania napätia	41
2.2.1 Fyzikálny princíp	41
2.2.2 Meranie	43

2.3	Deliče napätia	45
2.3.1	Fyzikálny princíp	45
2.3.2	Meranie	46
3	Zhrnutie a porovnanie metód	48
3.1	Zhrnutie metód merania prúdu	48
3.2	Zhrnutie metód merania napätia	50
4	Praktická časť	51
4.1	ABB UniGear ZS1	51
4.1.1	Umiestnenie senzora v rozvádzači.....	53
4.2	Magnetorezistívny senzor	57
4.3	Návrh a výroba prúdového senzora	59
4.3.1	Výber napäťového stabilizátora.....	60
4.3.2	Výber operačného zosilňovača	62
4.3.3	Návrh obvodu	62
4.4	Meranie vlastností prúdového senzora	63
4.4.1	Meracie prístroje	64
4.4.2	Priebeh merania	64
4.5	Vyhodnotenie merania	66
4.5.1	Vyhodnotenie merania pre frekvenciu 50 Hz	66
4.5.2	Vyhodnotenie merania pre frekvenciu 60 Hz	72
4.5.3	Prenosové charakteristiky senzorov.....	77
4.6	Senzor pre UniGear ZS1	79
4.7	Porovnanie s technológiami využívanými v ABB.....	81
5	Záver	82
	Literatúra	84
	Zoznam skratiek	88
	Zoznam obrázkov	89
	Zoznam tabuliek	94

Príloha 1	95
Príloha 2	98

ÚVOD

Námet na diplomovú prácu Nekonvenčné metódy merania napätia a prúdu vznikol v spoločnosti ABB s.r.o. Firma ABB je poprednou svetovou spoločnosťou v odbore energetiky a automatizačných technológií.

V energetickom priemysle sa za konvenčné spôsoby merania napätia a prúdu považujú napäťové, respektíve prúdové prístrojové transformátory. Prístrojové transformátory využívajú na prevod meranej veličiny zákon elektromagnetickej indukcie a ich účelom je znížiť meranú veličinu natoľko, aby ju bolo možné zobraziť či spracovať na zobrazovacom zariadení. K dispozícii je však viacero odlišných metód, využívajúcich fyzikálne javy spojené s prenosom elektrickej energie, k určeniu veľkosti napätia či prúdu.

Slovné spojenie nekonvenčné metódy merania nemusí vyslovene znamenať, že sa jedná o doposiaľ neobjavenú technológiu, prípadne technológiu, ktorá je absolútnou novinkou. V tomto prípade je možné toto slovné spojenie vysvetliť ako meraciu metódu, ktorá síce existuje, je možné že sa tiež používa, ale nie je rozšírená v odbore jej pôsobnosti.

Diplomová práca má za cieľ nájsť a popísať metódy merania napätia a prúdu, ktoré spĺňajú vyššie spomenuté podmienky a na základe štúdia týchto metód vybrať takú, ktorá by mohla byť prínosom pre firmu ABB a jej produktové portfólio. Ideálne pre divíziu vysokonapäťových rozvádzačov sídliacu v Brne.

Vybráním takto perspektívnej metódy by malo nasledovať jej praktické odskúšanie, a vyhodnotenie, či má takáto nekonvenčná metóda merania potenciál nahradiť konvenčné spôsoby, ktoré sú v prípade vysokonapäťových rozvádzačov prístrojové transformátory.

1 NEKONVENČNÉ METÓDY MERANIA PRÚDU

Nekonvenčné metódy merania prúdu spomenuté v tejto kapitole, sú všetky založené na magnetickom poli generovanom v okolí vodiča, cez ktorý prechádza prúd. Z toho dôvodu je uvedené stručné zhrnutie magnetizmu a fyzikálnych zákonov platných pre generované magnetické pole v okolí vodiča. Následne je uvedený popis jednotlivých nekonvenčných metód.

1.1 Magnetizmus

Magnetizmus je fyzikálny jav, ktorého zdrojom je pohybujúci sa náboj. Môže sa jednať o elektrický prúd, teda pohyb náboja z jedného miesta na druhé, alebo samotný pohyb elektrónov v atómových orbitáloch a ich spin. Tento pohyb vytvára magnetické pole, ktoré pôsobí silou na iné magnetické častice. Magnetické pole je časťou elektromagnetického poľa, ktorých vzájomný vzťah je definovaný Maxwellovými rovnicami.

Magnetické pole je definované magnetickou indukciou \vec{B} a intenzitou magnetického poľa \vec{H} . Obe veličiny sú vektorového charakteru.

Magnetická indukcia \vec{B} je vektorová fyzikálna veličina vyjadrujúca silové účinky na pohybujúce sa častice s nábojom alebo dipólovým momentom. Jednotkou je tesla [T]. Je to hlavná veličina slúžiaca ku kvantitatívnemu popisu magnetického poľa a môže byť definovaná rovnicou (1.1) ako:

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (1.1)$$

Intenzita magnetického poľa je vyjadrená veličinou \vec{H} a popisuje mieru silových účinkov magnetického poľa v určitom mieste na myslený magnetický náboj. Jednotkou tejto veličiny je [Am⁻¹]. Intenzita magnetického poľa nie je závislá na vonkajšom prostredí, na rozdiel od magnetickej indukcie. Vzájomný vzťah intenzity magnetického poľa a magnetickej indukcie je znázornený rovnicou (1.2)

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.2)$$

kde μ je permeabilita prostredia vyjadrená jednotkou Hm⁻¹. Permeabilita prostredia je súčin permeability vákua a relatívnej permeability, pričom relatívna permeabilita je číslo

vyjadrujúce násobok permeability vákua tak, aby tento súčin zodpovedal hodnote konkrétneho materiálu, ako je znázornené rovnicou (1.3)

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (1.3)$$

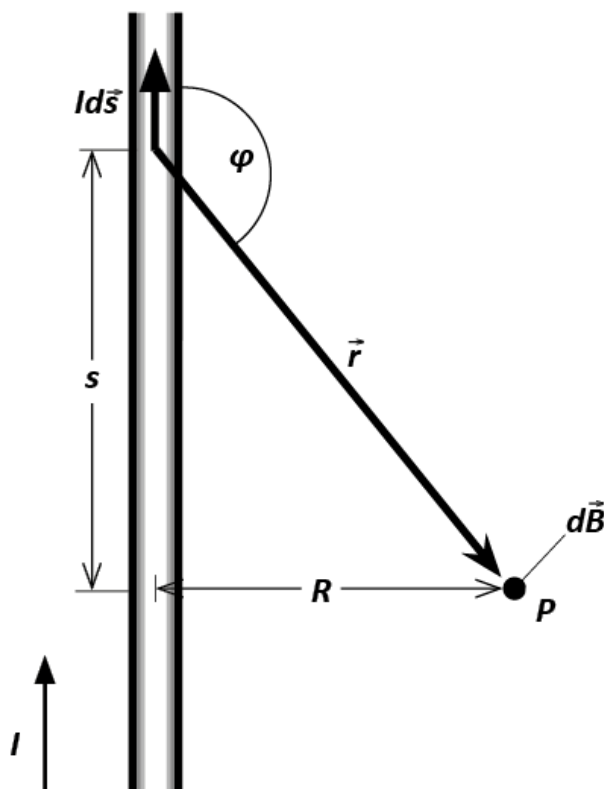
1.1.1 Biot-Savartov zákon

Ako už bolo spomenuté, zdrojom magnetického poľa je pohybujúci sa elektrický náboj, teda aj pohyb elektrónov vo vodiči – elektrický prúd.

Magnetické pole vytvorené tokom prúdu v ľubovoľnom vodiči popisuje Biot-Savartov zákon, znázornený rovnicou (1.4)

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{s} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (1.4)$$

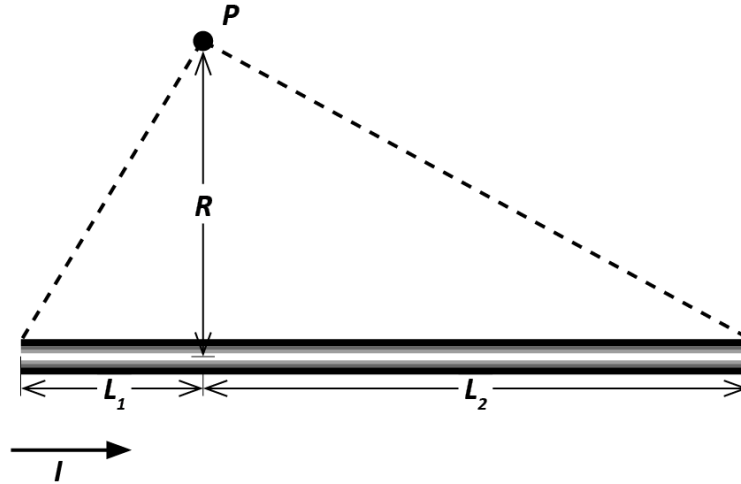
kde $I d\vec{s}$ je prúdový element vektorového charakteru, vytvárajúci magnetické pole, k ľubovoľne vybranému bodu P a \vec{r} polohový vektor smerujúci od prúdového elementu k bodu P , vid' obr. 1. [1]



Obr. 1: Znázornenie jednotlivých prvkov Biot-Savartovho zákona na vodiči s pretekajúcim prúdom. [1]

Pre vodič o kruhovom priereze s konečnou dĺžkou je možné výpočtom integrálu upraviť vzorec do podoby znázornenej rovnicou (1.5).

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \left(\frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2}} \right) \quad (1.5)$$



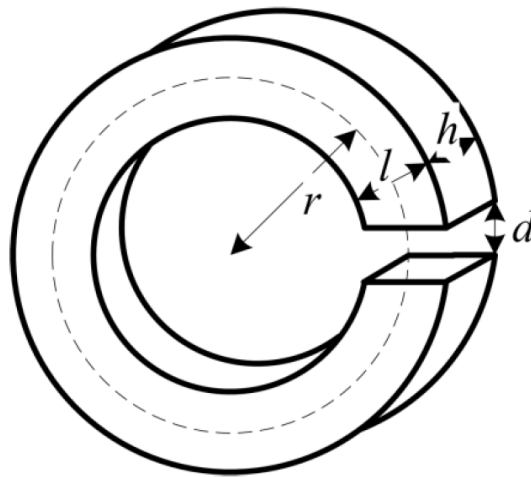
Obr. 2: Znázornenie jednotlivých prvkov integrovaného Biot-Savartovho zákona na vodiči s prúdom.

1.1.2 Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere

Pre koncentráciu magnetického poľa z okolia vodiča sa používa koncentrátor magnetického poľa, prstenec z magneticky mäkkého materiálu. Prstenec môže obsahovať vzduchovú medzeru. Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere je vypočítaná pomocou rovnice (1.6)

$$B = \frac{\mu_0 I_P}{d + \frac{2\pi r - d}{\mu_r}} \approx \frac{\mu_0 I_P}{d} \quad (1.6)$$

kde B je magnetická indukcia, μ_0 je permeabilita vákua, μ_r je relatívna permeabilita magnetického jadra, r je stredný polomer magnetického jadra, d je dĺžka vzduchovej medzery v magnetickom jadre a I_P je primárny prúd pretekajúci vodičom, ktorý je umiestnený v strede feromagnetického jadra. Z dôvodu vysokých hodnôt permeability feromagnetického materiálu, rádovo v tisícoch, je možné člen rovnice $(2\pi r - d)/\mu_r$ zanedbať, pretože sa bude limitne približovať nule. Jednotlivé označenia veličín feromagnetického jadra sú znázornené na obr. 3. [2]



Obr. 3: Feromagnetické jadro so vzduchovou medzerou so znázornenými jednotlivými označeniami veličín. [2]

1.2 Hallova sonda

Meranie prúdu pomocou Hallovej sondy využíva fyzikálny jav spočívajúci vo vybočení voľných nosičov vo vodiči vplyvom magnetického poľa, nazývaný aj ako Hallov jav. Pomocou Hallovej sondy je možné merať ako jednosmerný, tak aj striedavý prúd, bez potreby galvanického pripojenia sa k meranému obvodu. [3]

Hallova sonda je zariadenie malých rozmerov, s nízkym energetickým odberom, imúnna voči vonkajšiemu šumu. [3]

1.2.1 Fyzikálny princíp

Hallov jav pracuje na fyzikálnom princípe vychýľovania nosičov náboja pomocou Lorentzovej sily. Pohybujúce sa nosiče náboja vo vodivej alebo polovodičovej látke, ktorá sa nachádza v magnetickom poli, ktorého siločiaru sú kolmé na smer pohybu nosičov náboja, sú vplyvom Lorentzovej sily vychýľované k bočným hranám vzorky, čím ju elektricky nabíjajú. Vzťah pre Lorentzovu silu v prípade 90° uhlu medzi siločiarami magnetického poľa a smerom pohybu nosičov náboja je uvedený rovnicou (1.7)

$$F_y = q v_d B_z \quad (1.7)$$

kde F_y je sila pôsobiaca v osi Y, viď obr. 4, q je elementárny náboj, B_z je magnetická indukcia v osi Z a v_d je driftová rýchlosť nosičov náboja. Vznikajúce elektrické pole – Hallovo pole – kompenzuje účinok tejto sily silou pôsobiacou proti Lorentzovej sile. Táto

sila je znázornená rovnicou (1.8)

$$F_y = q E \quad (1.8)$$

kde E je intenzita elektrického poľa. [1]

U väčšiny materiálov je toto napätie tak malé, že nie je prakticky využiteľné. Jav je možné výraznejšie sledovať na polovodičových materiáloch s vysokou pohyblivosťou nosičov náboja, napríklad indium arzenid (InAs) a indium antimonid (InSb). [4]

Po vystavení doštičky z vodivého, alebo polovodičového materiálu magnetickému poľu B kolmému na smer pohybu nosičov náboja, pôsobí magnetická sila F_B na každý prechádzajúci elektrón tak, že ho tlačí k jednému okraju doštičky. Strana doštičky, ku ktorej sú nosiče náboja tlačené, je určená smerom vektora magnetickej indukcie. Behom určitej doby sa nosiče náboja kopia na jednej strane doštičky, čím na druhej strane doštičky ostanú nevykompenzované kladné náboje. Tým vzniká elektrické pole s intenzitou E vo vnútri prúžku. Toto pole má opačný smer ako magnetická sila F_B , teda zároveň tlačí nosiče náboja do druhej strany. Behom veľmi krátkej doby nastane rovnováha medzi elektrickou silou F_E a magnetickou silou F_B . Sily sa tým pádom vyrušia, nosiče náboja sa budú pohybovať svojou driftovou rýchlosťou po pozdĺžnom smere doštičky. Potom náboj nahromadený na jednej strane a ním vytvorené elektrické pole E už ďalej neporastie. Tým medzi protiľahlými priečnymi stranami doštičky o hrúbke d vznikne rozdiel potenciálov – Hallovo napätie, určené súčinom intenzity elektrického poľa a vzdialenosti krajov doštičky w (1.9). [1]

$$U_H = E w \quad (1.9)$$

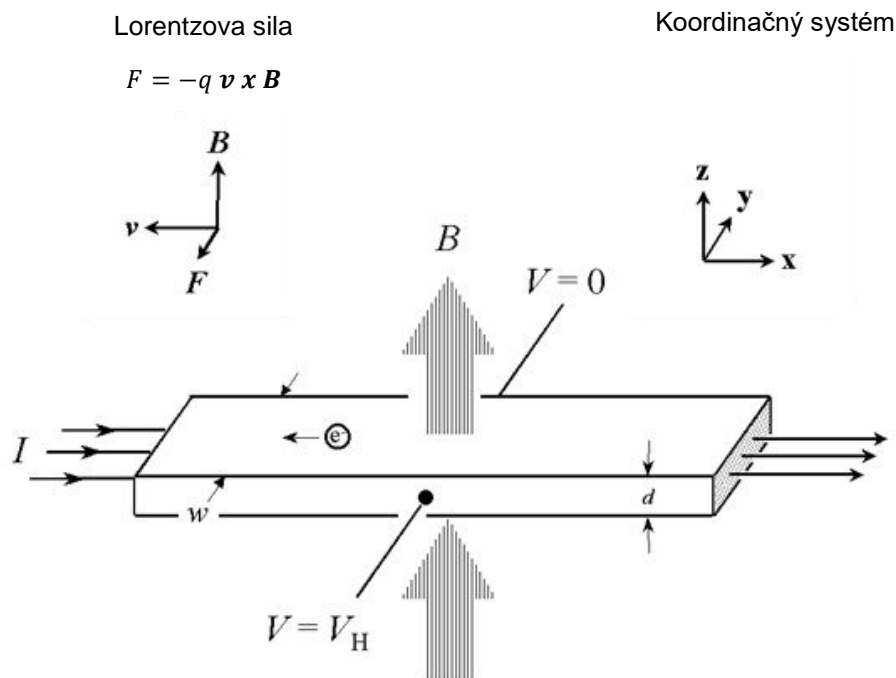
Pre jednotlivé materiály je definovaná konštanta R_H podľa rovnice (1.10)

$$R_H = \frac{E}{J B} \quad (1.10)$$

kde J je prúdová hustota na priečnom priereze doštičky. Po dosadení rovnice (1.10) do rovnice (1.9) dostaneme vzťah pre výpočet Hallovho napätia (1.11).

$$U_H = R_H \frac{I_c B}{d} \quad (1.11)$$

Veľkosť Hallovho napätia priamo úmerne závisí od veľkosti riadiaceho prúdu I_c , veľkosti magnetickej indukcie B , veľkosti Hallovej konštanty R_H a nepriamo úmerne od hrúbky materiálu snímača d . Veľkosť Hallovej konštanty R_H je daná vlastnosťami použitého materiálu – koncentráciou a pohyblivosťou nosičov náboja. [1]



Obr. 4: Znázornenie Hallovho javu. [5]

1.2.2 Meranie

Základný princíp merania elektrického prúdu je založený na meraní magnetického poľa, ktoré sa vytvára okolo vodiča, ktorým preteká elektrický prúd.

Pri meraní Hallovou sondou meriame magnetické pole vodiča, cez ktorý preteká zisťovaný prúd. Vodič je obklopený magnetickým obvodom – prstencom z magneticky mäkkého materiálu. Magnetické pole v prstenci je úmerné pretekajúcemu prúdu cez vodič, ktorý obklopuje. Pri udržiavaní riadiaceho prúdu I_C Hallovej sondy na konštantnej hodnote sa Hallovo napätie mení úmerne so zmenou magnetického poľa v prstenci – teda s pretekajúcim prúdom v meranom vodiči. [3]

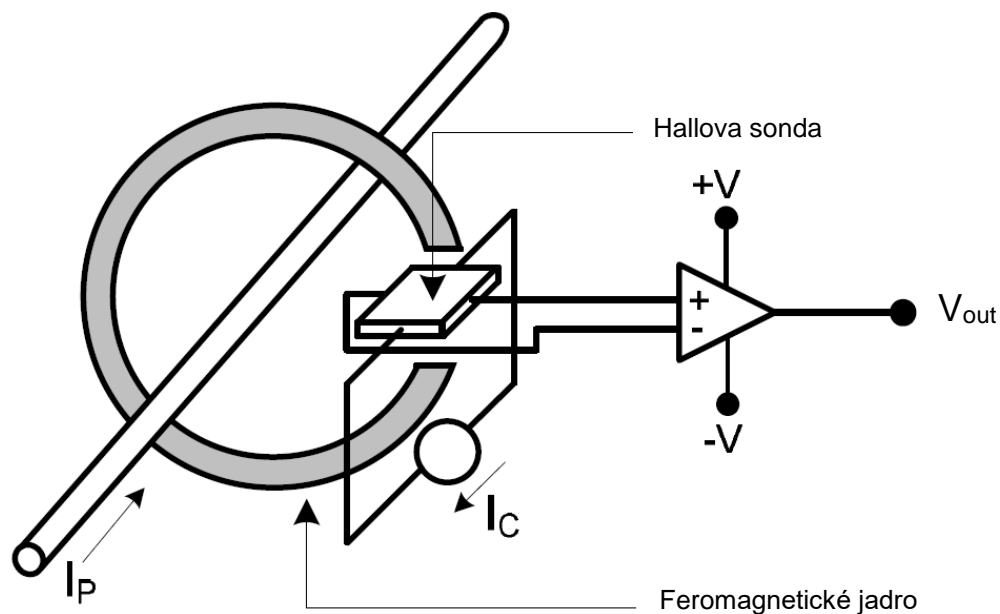
Používajú sa dva princípy merania prúdu pomocou Hallovej sondy, ktoré odstraňujú niektoré nevýhody samotnej Hallovej sondy, ako napríklad teplotnú závislosť, malú citlivosť, obmedzený rozsah linearity, citlivosť na mechanické namáhanie a polohu či obmedzený frekvenčný rozsah. Týmito metódami sú: [3]

- Snímanie prúdu pomocou Hallovej sondy v otvorenej slučke
- Snímanie prúdu pomocou Hallovej sondy v uzavretej slučke

Snímanie prúdu pomocou Hallovej sondy v otvorenej slučke

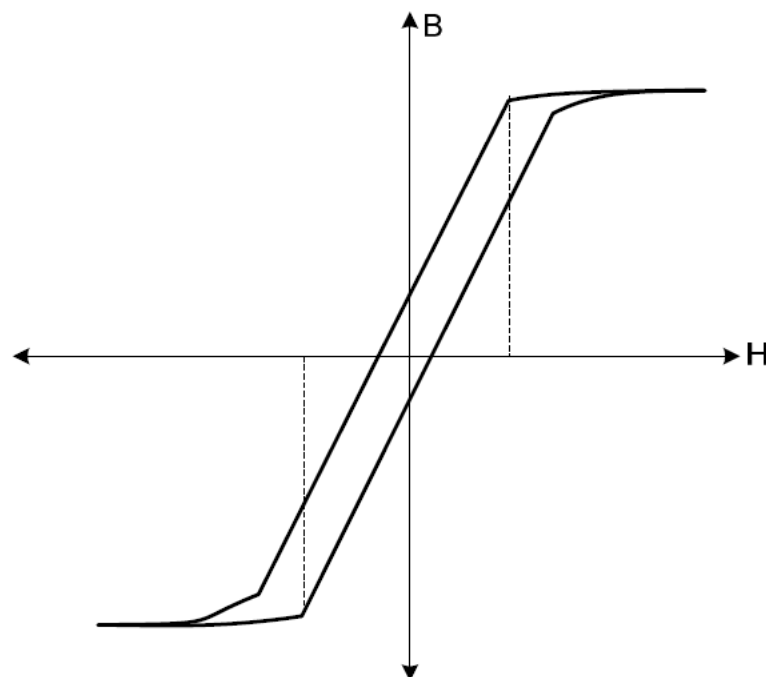
Prúdový senzor používajúci Hallovu sondu v otvorenej slučke využíva feromagnetické jadro z materiálu s vysokou permeabilitou – využívané na koncentráciu poľa. V magnetickom jadre je vzduchová medzera, cez ktorú prechádza vodič, cez ktorý tečie

snímaný prúd I_p . Samotné jadro nie je celistvé, prstenec obsahuje po jeho obvode prerušenie – vzduchovú medzeru – kde je vložená Hallova sonda. Hallovo napätie generované prostredníctvom magnetického poľa je zosilnené pomocou operačného zosilňovača a následne je zmerané meracím prístrojom. Názornú ukážku schematického zapojenia Hallovej sondy v otvorenej slučke je možné vidieť na obr. 5. [3]



Obr. 5: Hallová sonda v usporiadaní merania v otvorenej slučke. [3]

Výstup z Hallovej sondy pri meraní v otvorenej slučke má tvar hysteréznej slučky, z dôvodu prítomnosti feromagnetického prstenca, s lineárnou časťou priebehu, ako je znázornené na obr. 6. Napätie V_H je úmerné magnetickej indukčii B , ktorá je úmerná prúdu I_p v lineárnej oblasti hysteréznej slučky. Napätie V_H musí byť zosilnené a kompenzované pre odstránenie offsetu. [3]



Obr. 6: Hysterézná krivka merania senzora s Hallovou sondou v otvorenej slučke. [3]

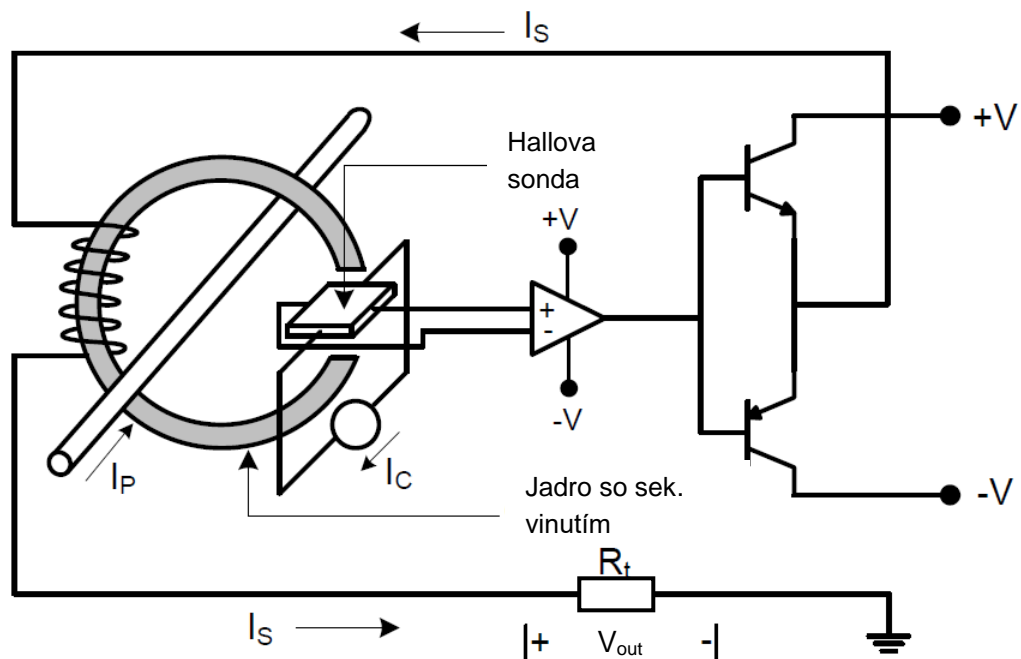
Senzormi s Hallovou sondou v otvorenej slučke je možné merať jednosmerné aj striedavé prúdy. Výhodami sú jednoduchá konštrukcia, nízka cena, nízka spotreba energie a malé rozmery aj pre meranie vysokých prúdov.

Medzi nevýhody patrí zahrievanie magnetického jadra spôsobené vyššími frekvenciami, malá šírka pásma (DC až 25 kHz), obmedzený rozsah linearity, vysoký offset, chyby zisku (gain drift) a menšia presnosť. Pre prúdy nižšie ako 50 A je pre vyššiu presnosť potrebné vodič s meraným prúdom navinúť na feromagnetické jadro niekoľkými otočkami. Toto však nie je možné vo všetkých prípadoch a taktiež straty v magnetickom jadre narastajú s druhou mocninou počtu závitov. [3]

Snímanie prúdu pomocou Hallovej sondy v uzavretej slučke

Prúdový senzor pozostávajúci z Hallovej sondy v uzavretej slučke má výrazne lepšie vlastnosti, ako prúdový senzor v otvorenej slučke. Základom senzora je, podobne ako v predchádzajúcom prípade, feromagnetické jadro so štrbinou, ktorá slúži na umiestnenie Hallovej sondy. Na jadro je v tomto prípade navinuté slaboprúde sekundárne vinutie spojené s operačným zosilňovačom cez push-pull zosilňovač. Takto vzniká záporná spätnoväzobná slučka. [3]

Hallovo napätie, úmerné magnetickej indukcii v magnetickom jadre, generované Hallovou sondou, je zosilnené pomocou operačného zosilňovača. Výstup operačného zosilňovača je napojený na push-pull zosilňovač, ktorého prúdový výstup je dodávaný do cievky navinutej na magnetickom jadre. Schematické znázornenie Hallovho senzora v uzavretej slučke je znázornené na obr. 7. [3]



Obr. 7: Haloova sonda v usporiadaní merania v uzavretej slučke. [3]

Prúd I_S dodávaný push-pull zosilňovačom cez sekundárne vinutie do magnetického jadra vytvára magnetickú indukciu rovnakú, ako je generovaná z primárneho vodiča meraným prúdom I_P , ale v obrátenom smere. Magnetická indukcia v jadre sa tým pádom eliminuje. Haloova sonda v tomto prípade deteguje nulovú magnetickú indukciu. Prúd I_C ňou prechádzajúci je, ako v prvom prípade, konštantný. Pri akýchkoľvek výkyvoch magnetického poľa spôsobených primárnym vodičom teda zareaguje a cez spätnú väzbu prúdom I_S pole vykompenzuje. Prúd I_S je teda úmerný prúdu I_P , ktorý prechádza primárnym vodičom, podľa rovnice (1.12)

$$I_P = I_S \frac{N_S}{N_P} \quad (1.12)$$

kde N_S je počet závitov sekundárneho vinutia a N_P počet závitov primárneho vinutia. [3]

Tento prúd sa dá jednoducho previesť na napätie vložení referenčného rezistora a následne sa dá merať. Udržiavanie magnetického jadra pri nulovej alebo iba miernej magnetickej indukcii má pozitívny vplyv na presnosť pre zotrvávanie v lineárnej oblasti merania, a tiež odstraňuje nepresnosti spôsobené hysteréziou. [3]

Veľkosťou referenčného rezistoru R_T je možné prispôbiť meranie konkrétnej aplikácie, použitím výkonového rezistoru získame senzor schopný merať vysoký prúdový rozsah. Pridaním paralelného kondenzátora je možné filtrovať vysokofrekvenčné zložky spätnoväzobného signálu. [3]

Haloova sonda v zapojení v uzavretej slučke poskytuje vysokú presnosť, veľkú šírku

pásma, veľmi rýchlu odozvu, výbornú linearitu. Medzi nevýhody patrí väčšia spotreba energie, vyššia cena, väčšie rozmery a limitovaný tok prúdu sekundárnym vinutím s ohľadom na napájacie napätie. [4]

1.3 Optické metódy

Meranie prúdu pomocou optických senzorov je založené na Faradayovom jave. Ten spočíva v ovplyvňovaní optických vlastností meraného materiálu pôsobením vonkajšieho magnetického poľa – materiál sa stane opticky aktívny. Lineárne polarizovanému svetlu sa priechodom cez magnetooptický materiál pod vplyvom magnetického poľa otáča smer polarizácie. Uhol natočenia je lineárne úmerný veľkosti magnetického poľa.

1.3.1 Fyzikálny princíp

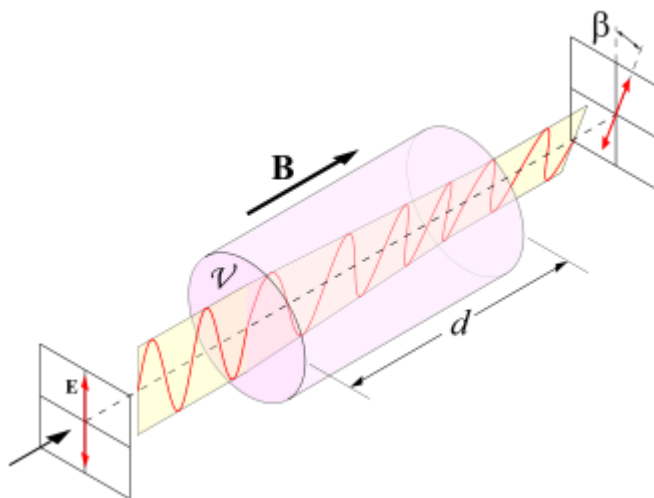
Lineárne polarizované svetlo je elektromagnetická vlna, ktorej magnetická a elektrická zložka sú presne vo fáze – teda stále v konštantnom pomere. Smer vektoru elektrického poľa je daný veľkosťou oboch amplitúd a je stále konštantný. Kruhovo polarizované svetlo je elektromagnetická vlna, ktorej fázový posun elektrickej a magnetickej zložky činí $\pm \pi/2$ rad. To znamená, že keď je jedna zložka v maxime, druhá je práve nulová. Výsledný vektor elektrického poľa, zložený z oboch komponent v rovine kolmej na smer pohybu, bude rotovať po kružnici. Podľa kladného a záporného fázového posunu je kruhová polarizácia ľavotočivá alebo pravotočivá. [6]

Pri interpretácii Faradayovho javu môžeme lineárne polarizovanú vlnu nahradiť superpozíciou ľavotočivej a pravotočivej kruhovo polarizovanej vlny. Elektrické pole reaguje s nabitými časticami obsiahnutými v magnetooptickom materiáli a vytvára v rámci materiálu vlastné magnetické pole, ktoré sa sčíta s externým magnetickým poľom, pretože vzniknuté magnetické pole je paralelné s externým magnetickým poľom. Pri priechode svetelnej vlny magnetooptickým materiálom nastanú dva deje. Pri jednom smere rotácie bude už vytvorené interné magnetické pole súbežné s externým magnetickým poľom, zatiaľ čo pri druhom smere rotácie bude protichodné s externým magnetickým poľom. Tým pádom bude magnetická indukcia v jednom smere zväčšená, a v druhom smere redukovaná. To ovplyvní dynamiku interakcie jednej aj druhej vlny, pričom jedna bude spomalená viac, ako druhá. Po prejdení svetelných vĺn materiálom sú obe vlny superpozične sčítané do jednej lineárne polarizovanej vlny, avšak už s fázovým rozdielom, spôsobujúcim natočenie vektora elektrického poľa. Vzťah medzi uhlom rotácie a magnetickým poľom je znázornený rovnicou (1.13) [6]

$$\beta = \nu B d \quad (1.13)$$

kde β je uhol rotácie, B je magnetická indukcia, d je vzdialenosť, ktorú musí svetlo

v materiáli prekonať a v je Verdetova konštanta vyjadrujúca schopnosť jednotlivých materiálov rotovať polarizovanú vlnu. Kladná Verdetova konštanta prináleží ľavotočivej rotácii, záporná pravotočivej. Jav je graficky znázornený na obr. 8. [6]



Obr. 8: Znázornenie rotácie polarizovanej elektromagnetickej vlny po prechode magnetooptickým materiálom. [6]

Niektoré materiály, ako napríklad terbium-gáliový granát (TGG) majú extrémne veľkú Verdetovu konštantu, približne -134 rad T^{-1} pre svetlo s vlnovou dĺžkou 632 nm. Pri silnom magnetickom poli vieme pomocou tohto materiálu dosiahnuť rotáciu až 45° . [6]

1.3.2 Meranie

Pre použitie rôznych prístupov k meraniu sa meranie prúdu pomocou optických elementov delí na tri základné druhy merania:

- Prúdový senzor s optickým vláknom
- Prúdový senzor z bloku skla
- Prúdový senzor s vláknom s Braggovou mriežkou

Prúdový senzor s optickým vláknom

Tento typ prúdového senzoru pozostáva z optického vlákna navinutého okolo vodiča s meraným prúdom. Samotné vlákno je z materiálu podporujúcom Faradayov jav, teda samotné je senzorickým materiálom. Nakoľko Verdetova konštanta je v tomto prípade pomerne malá, musí byť tento nedostatok kompenzovaný vyšším počtom závitov, aby bola rotácia svetelného lúča merateľná. Optické vlákno nevyžaduje precízne prispôbenie alebo nastavenie. Presnosť je ovplyvnená rôznymi dopantmi v jadre vlákna, alebo počtom závitov.

Presnosť takto zostaveného prúdového senzora je ovplyvnená optickým javom –

lineárnym a intrinzičným dvojlomom, kvôli ohýbaniu alebo vibráciám optického vlákna. Lineárny dvojlom je navyše teplotne závislý, teda senzor je citlivý na teplotné rozdiely.

Na meranie prúdu sa v dnešnej dobe používa priebežný Sagnacov interferometer, vyvinutý v spolupráci s firmou ABB. Do optického vlákna sú vyslané dve kruhovo polarizované svetelné vlny, jedna ľavotočivá, druhá pravotočivá. Meria sa ich fázový rozdiel, nakoľko toto meranie je jednoduchšie ako meranie rotácie polarity. Vláknom navinuté okolo vodiča má na konci odrazovú plochu, svetlo po odraze putuje naspäť po vlákne ku zdroju, kde je vyhodnotený fázový rozdiel. Toto usporiadanie je výhodné z hľadiska zanedbateľného vplyvu mechanických otrasov, vibrácií a teploty. Žíhanie vlákna má tiež priaznivý vplyv na odstránenie lineárneho dvojlomu. Vzťah medzi rozdielom fáz, počtom otočení optického vlákna okolo vodiča a prúdom je znázornený rovnicou (1.14)

$$\Delta\Phi = 4\pi N I \quad (1.14)$$

kde N je počet navinutí a $\Delta\Phi$ fázový rozdiel.

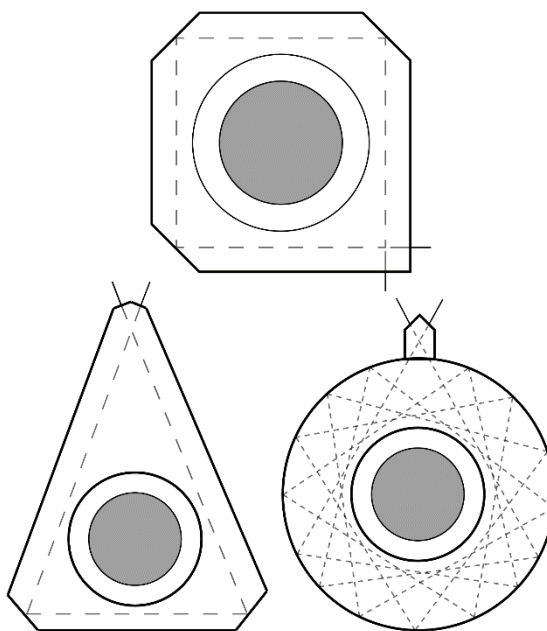
Senzor vykazuje veľkú presnosť a spĺňa triedy IEC Class 0.2S pre meranie a IEC Class 5P pre ochrany. Tento senzor vyvinula spoločnosť ABB, pričom vyvinula variantu pre striedavé aj jednosmerné prúdy. [7]

Prúdový senzor z bloku skla

Senzor sa skladá z magnetooptického materiálu, ktorý kompletne obklopuje vodič s meraným prúdom. Jedná sa o blok skla s robustnejším prevedením a relatívne malou hodnotou Verdetovej konštanty. Takto robustný senzor netrpí optickými chybami dvojlomu, ako optické vlákno. Existuje viacero variant vedenia svetelného lúču materiálom, či už presne jedenkrát, alebo niekoľko krát. Meria sa rotácia polarizácie lineárne polarizovaného svetla. [8]

Prvým návrhom bol senzor štvorcového tvaru s tromi odrazovými plochami v rohoch. Postupne sa vyvinuli trojuholníkový tvar a kruhový tvar. Trojuholníkový tvar využíva medzného uhlu a úplnú odrazivosť pre zachovanie stavu polarizovanosti. Tvar je jednoduchší na výrobu, avšak sú vysoké požiadavky na presnosť uhlov. Pre dosiahnutie medzných odrazových uhlov je nutné vyrobiť senzor s toleranciou uhlu skosenej strany $\pm 0,01\%$. [8]

Kruhové senzory taktiež využívajú úplnú odrazivosť, avšak svetlo obkruží meraný vodič 5 krát. Tým sa zvýši citlivosť senzoru. Tieto senzory sú však pomerne citlivé na vibrácie a otrasy. Tvary senzorov sú názorne ukázané na obr. 9. [8]



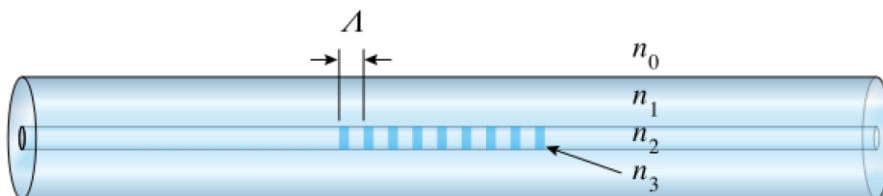
Obr. 9: Znáozornenie základných tvarov senzorov z magnetooptického materiálu používaných pre meranie prúdu. Šedý kruh je prierez vodiča s meraným prúdom, prerušovaná čiara znázorňuje svetelný lúč a jeho odrazy v materiáli. [8]

Vlákno s Braggovou mriežkou

Senzor tohto typu nevyužíva Faradayov efekt, ale interferometriu. Vlákno s Braggovou mriežkou je zložené z rôznych materiálov s rôznym indexom lomu, usporiadaných striedavo vedľa seba. Svetlo prechádzajúce cez vlákno sa na rozhraní dvoch oblastí odráža a láme. V prípade, že vlákno je tvorené z dvoch materiálov periodicky nasledujúcich za sebou, vid' obr. 10, vieme špecifikovať vlnovú dĺžku odrazeného svetla podľa rovnice (1.15)

$$\lambda_{Bragg} = n_{eff} \Lambda \quad (1.15)$$

kde λ_{Bragg} je vlnová dĺžka odrazeného svetla, tzv. Braggova dĺžka, n_{eff} je efektívna hodnota indexu lomu vlákna a Λ je dĺžková perióda opakujúcich sa oblastí. [8]

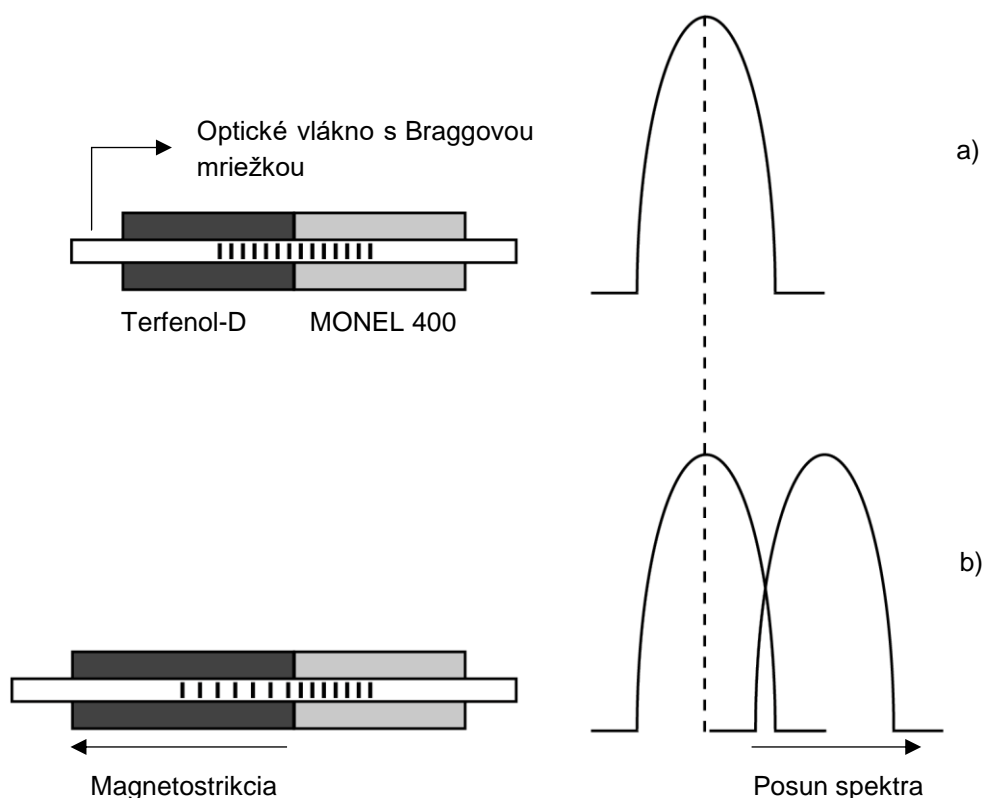


Obr. 10: Optické vlákno s Braggovou mriežkou so znázornenými rôznymi indexami lomu vo vlákne. [9]

Napínaním takéhoto vlákna teda vieme meniť dĺžkovú periódu Λ , čím sa mení vlnová dĺžka odrazeného svetla, ktorá je následne meraná. Pripevnením takéhoto vlákna na magnetostrikčný materiál tak vieme vytvoriť závislosť medzi magnetickým poľom a vlnovou dĺžkou. Tento princíp ale trpí javom tepelnej rozťažnosti a drahými meracími zariadeniami na meranie vlnovej dĺžky. [8]

Systém merania napnutia vlákna bol vylepšený pripevnením vlákna na dva spojené druhy materiálov – kovových zliatin (Terfenol-D a MONEL 400). Obrovskou výhodou je teplotná nezávislosť a možnosť využitia jednoduchšieho a lacnejšieho detekčného zariadenia. [8]

Pri nulovej magnetickej indukcii zobrazuje senzor jedno reflexné maximum. Pri aplikovaní magnetického poľa sa Terfenol-D z dôvodu magnetostrikčného mechanizmu natiahne, zatiaľ čo MONEL 400 zostane bezo zmeny. Toto má za následok zobrazenia druhého reflexného maxima posunutého oproti pôvodnému, ako je ukázané na obr. 11. Vplyvom natiahnutia vlákna sa maximum posunie na vyššiu vlnovú dĺžku. Takéto maximá je možné merať jednoduchým fotodetektorom merajúcim ich intenzitu. [8]



Obr. 11: Znáozornenie rozťažnosti jednotlivých materiálov a) v magnetickom poli, a b) mimo magnetického poľa, a posun spektra vplyvom rozťažnosti. [8]

Nezávislosť na teplote je dosiahnutá rovnakou tepelnou rozťažnosťou oboch

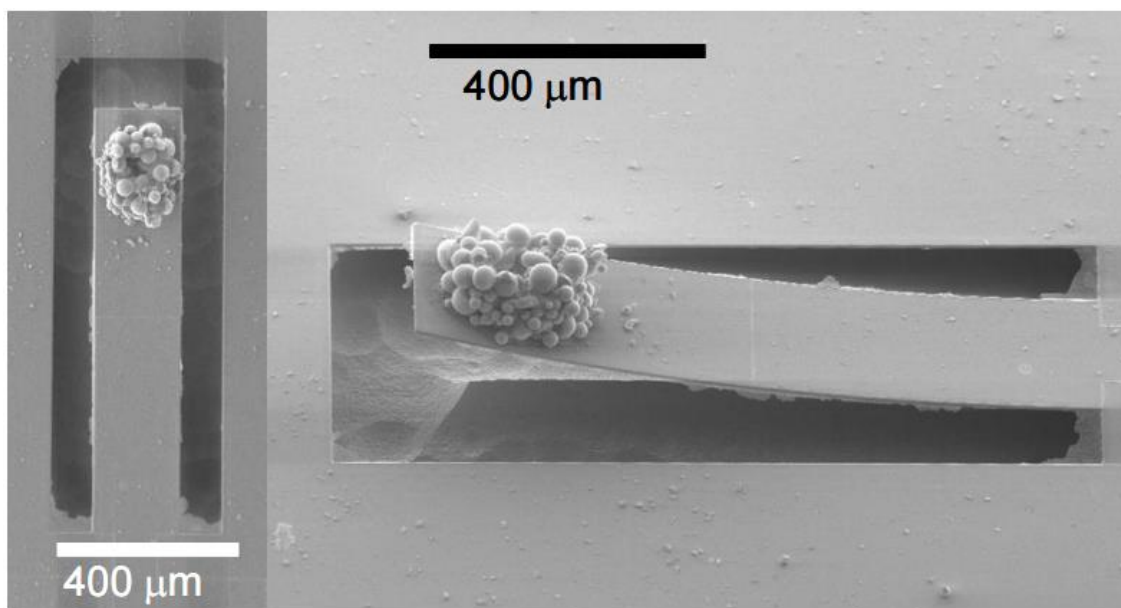
materiálov, čo spôsobí posun oboch maxím rovnakým smerom. Prekryv spektier tak ostáva konštantný, intenzita taktiež. Sensor je teda nezávislý na teplote. Šírkou pásma sú však obmedzené kvôli Terfenolu-D na niekoľko kHz. [8]

1.4 Piezoelektrické a optické senzory v MEMS obvodoch

Piezoelektrické prúdové senzory pracujú na princípe mechanickej deformácie piezoelektrického materiálu. Piezoelektrický materiál je mechanicky deformovaný vplyvom magnetického poľa vznikajúceho prechodom prúdu v meranom vodiči. V prípade optického merania je opticky vyhodnotená mechanická deformácia MEMS obvodu.

1.4.1 Fyzikálny princíp

Piezoelektrický jav je zvláštny polarizačný jav, ktorý spočíva v schopnosti niektorých kryštalických dielektrík polarizovať sa pri mechanickej deformácii (tlak, ťah, krútenie, ohyb). Tým sa na ich povrchu vytvorí náboj, ktorý je možné jednoducho merať.



Obr. 12: MEMS jazýček s naneseným magnetickým materiálom na jeho voľnom konci. [10]

Prúdový senzor, ktorý je možné vidieť na obr. 12, pozostáva z MEMS vysunutého jazýčku s jedným voľným koncom, s naneseným magnetickým materiálom na špičke. Pre tento tvar piezoelektrického jazýčku bol vypracovaný analytický model závislostí medzi mechanickým napätím, elektrickým napätím a silou pôsobiacou na jazýček. Model je znázornený rovnicami (1.16) a (1.17) [10]

$$\ddot{S} + 2\zeta_m \omega_n \dot{S} + \omega_n^2 S = \frac{k_{sp} a_1 d_{31}}{m t_p} V + \frac{F_{in}}{k_2 m} \quad (1.16)$$

$$\dot{V} = \frac{a_3 \dot{c}_p d_{31} t_p}{a_2 \varepsilon} \dot{S} \quad (1.17)$$

kde S je napnutie piezoelektrického materiálu vplyvom vyhnutia jedného konca jazýčku, V je napätie vzniknuté na piezoelektrickej vrstve, F_{in} je sínusová sila pôsobiaca na voľný koniec jazýčku, m je hmotnosť magnetu naneseného na voľnom konci, k_{sp} je pružinová konštanta výchylky voľného konca jazýčku, k_2 je geometrická hodnota vzťahujúca sa k vychýleniu jazýčku k priemernému napnutiu piezoelektrickej vrstvy, ω_n je uhlová frekvencia vlastného kmitania ekvivalentného náhradného mechanického obvodu, ζ_m je koeficient mechanického tlmenia, t_p je hrúbka piezoelektrického materiálu, c_p jeho modul pružnosti, d_{31} jeho väzobná konštanta, ε jeho permitivita. Konštanty a_1 , a_2 a a_3 určujú, či je piezoelektrický jazýček unimorfny alebo sériovo či paralelne bimorfny. [10]

Laplaceovou transformáciou je možné získať frekvenčne závislú funkciu (1.18). Rovnica popisuje výstupné napätie piezoelektrického materiálu na kmitajúcom jazýčku s určitou frekvenciou, v závislosti na sínusovej sile pôsobiacej na magnet na jeho konci.

$$V_{oc} = F_{in} \frac{c_p d_{31} t_p a_3}{\varepsilon k_2 m a_2} \frac{1}{\omega_n^2 \left(1 - \frac{c_p d_{31}}{\varepsilon}\right) - \omega^2 - j(2\zeta_m \omega_n \omega)} \quad (1.18)$$

V tomto prípade je F_{in} amplitúda sínusovej sily pôsobiacej na voľný koniec jazýčku, ω je jej uhlová frekvencia kmitov jazýčku. [10]

1.4.2 Meranie

Magnetické pole vodiča s meraným prúdom pôsobí na MEMS jazýček s deponovaným permanentným magnetom na jej voľnom konci. Pri priechode striedavého prúdu cez meraný vodič vzniká striedavé magnetické pole, ktoré rozkmitá jazýček frekvenciou meraného prúdu. [11]

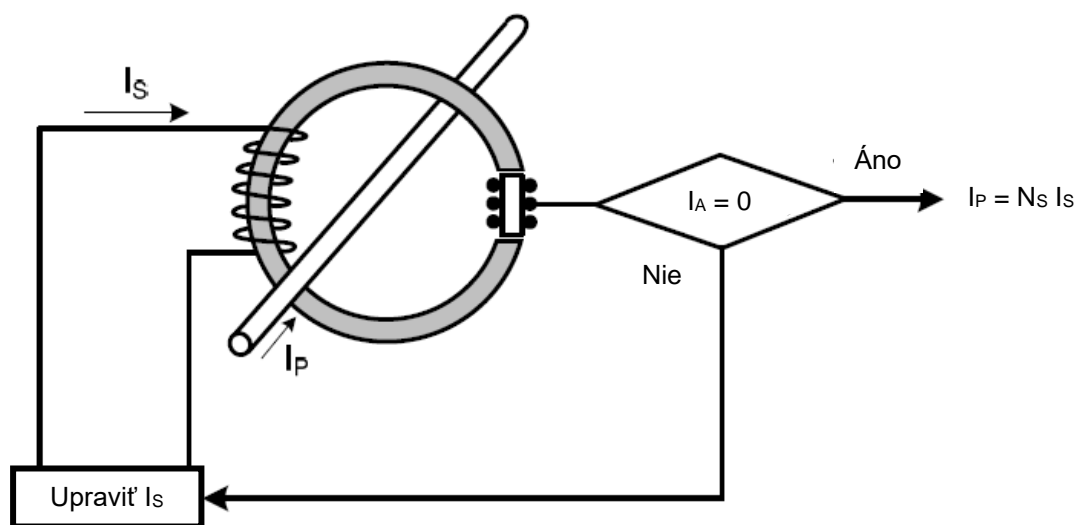
Senzor sa pri meraní môže prevádzkovať pri jeho rezonančnej frekvencii ako aj mimo nej. V prípade, že sa rezonančná frekvencia senzora a frekvencia meraného prúdu rovná, jazýček kmitá vo výrazne vyšších amplitúdach, ako v prípade nerovnosti frekvencií, čím poskytuje väčšie indukované napätie. V [11] bolo zmerané maximálne vychýlenie pre rezonančný stav 600 μm a pre nerezonančný stav 3,5 μm pri testovacom prúde 1,5 A. Napät'ová odozva nebola v tejto práci zmeraná, ale len simulovaná. Výstupné napätie bolo simulované na 0,25 až 0,5 V pri mimorezonančnej frekvencii, zatiaľ čo pri rezonančnej frekvencii dosahovala hodnota výstupného napätia 3V.

V literatúre sa spomínajú senzory schopné merať od desiatok mA do 10 A, možnosť merania v rádoch tisícov ampérov nebola v literatúre spomenutá. Je však predpoklad, že

umiestnením a tiež konštrukciou senzora je možné takéto hodnoty dosiahnuť.

1.5 Saturačná cievka

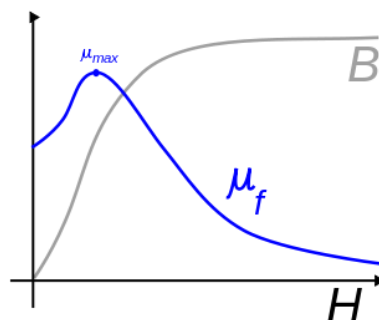
Prúdový senzor založený na princípe saturačnej cievky vyzerá veľmi podobne Hallovmu senzoru v uzavretej slučke. Metóda využíva saturačnú cievku miesto Hallovej sondy. Základom je zmena indukcie cievky vplyvom zmeny permeability jej jadra. V praxi sa tiež nazýva flux gate sensor.



Obr. 13: Schematické znázornenie princípu flux gate senzora. [3]

1.5.1 Fyzikálny princíp

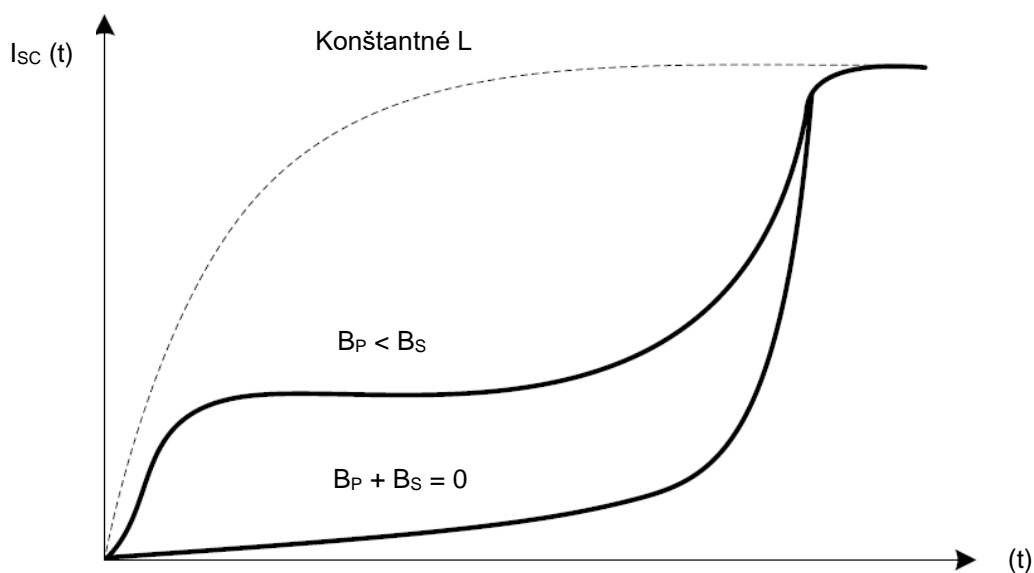
Saturačná cievka sa skladá z tenkého magnetického jadra s vysokou permeabilitou s navinutým vinutím. Je vložená do vzduchovej medzery feromagnetického prstenca obklopujúcom meraný vodič, prípadne je celý feromagnetický prstenec bez vzduchovej medzery využitý ako saturačná cievka. Externé magnetické pole indukované meraným prúdom I_p dostáva feromagnetické jadro saturačnej cievky do saturácie, čím sa jeho permeabilita dostane do maxima a rastom magnetickej indukcie sa vplyvom saturácie začne znižovať. Zariadenie je schematicky znázornené na obr. 13. Zmena permeability ovplyvňuje indukčnosť cievky navinutej na magnetickom jadre. Induktancia L je vysoká pri nízkych prúdoch a znižuje sa narastaním prúdu I_p , teda klesaním hodnoty permeability jadra. Závislosť permeability na veľkosti magnetického poľa je znázornená na obr. 14. [3]



Obr. 14: Závislosť permeability feromagnetického materiálu a magnetickej indukcie na veľkosti magnetického poľa. [3]

Podobne ako pri Hallovom prúdovom senzore v uzavretej slučke, aj tento typ prúdového senzoru je výhodné prevádzkovať pri nulovej, vykompenzovanej magnetickej indukcii. Na magnetickom jadre je teda navinuté sekundárne vinutie, ktoré prúdom I_S vytvára ekvivalentnú magnetickú indukciu obráteného smeru. [3]

Prúdová odozva I_{SC} z vinutia saturačnej cievky na napäťový jednotkový skok do vinutia saturačnej cievky, je znázornená na obr. 15. Magnetická indukcia B_P je vyvolaná primárnym vodičom s meraným prúdom v magnetickom jadre, B_S je magnetická indukcia vyvolaná sekundárnym vinutím na magnetickom jadre. B_S má vektor opačného smeru ako B_P . [3]



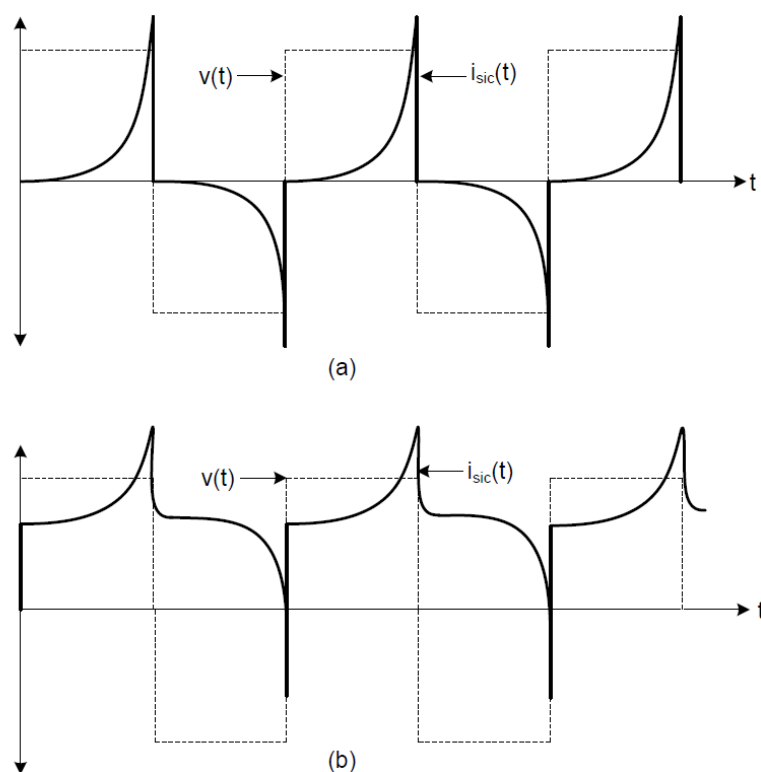
Obr. 15: Zobrazenie časových priebehov výstupného prúdu saturačnej cievky v závislosti na vonkajších podmienkach magnetickej indukcie. [3]

Priebeh konštantnej indukčnosti L znázorňuje priebeh pri nemennej indukčnosti cievky. Priebeh kompenzovanej magnetickej indukcie, teda keď $B_p + B_s = 0$, je špecifický pomalým zvyšovaním sa prúdu. Jadro nie je saturované, keď však prúd prekročí hranicu saturácie, indukčnosť cievky rapídne poklesne a prúd skokovo narastá. [3]

V prípade, že $B_p < B_s$, teda magnetická indukcia nie je vykompenzovaná, je pre malý prúd I_{SC} dominantná indukcia B_s , feromagnetické jadro je v saturácii, prúd narastá rýchlo. Pri určitom náraste prúdu I_{SC} cievka indukuje magnetické pole s indukciou B_{SC} , ktorá indukciu B_s vykompenzuje, jadro stráca saturačný stav, permeabilita a indukčnosť sú veľké, prúd I_{SC} narastá pomaly. V určitom okamihu však nastane $B_p > B_{SC}$, čo má za následok ďalší prudký nárast prúdu. [3]

1.5.2 Meranie

Meranie prebieha prúdovou odozvou na obdĺžnikový napäťový priebeh vkladaný na cievku so saturačným jadrom. Priebeh prúdovej odozvy s vykompenzovanou magnetickou indukciou a bez vykompenzovanej magnetickej indukcie je možné vidieť na obr. 16.



Obr. 16: Časový priebeh prúdovej odozvy saturačnej cievky na obdĺžnikový signál, a) bez vykompenzovanej magnetickej indukcie, a b) s vykompenzovanou magnetickou indukciou. [3]

Priemerná hodnota získaného prúdu I_A potom riadi kompenzačnú cievku pre kompenzáciu magnetickej indukcie opačného smeru. V prípade, že priemerná hodnota je rovná nule, platí pre výpočet meraného primárneho prúdu rovnaký tvar ako pri Hallovom prúdovom senzore, znázornený rovnicou (1.19). [12]

$$I_p = I_s \frac{N_s}{N_p} \quad (1.19)$$

Nevýhodou tohto senzora je možné injektovanie šumu od obdĺžnikového priebehu do primárneho vedenia cez saturačnú cievku a následný transformátorový efekt. [12]

Riešením na tento nedostatok je použitie druhého, úplne rovnakého jadra, s rovnakým saturačným vinutím. Sekundárne vinutie je v tomto prípade spoločné pre obe jadrá. Úlohou druhého saturačného vinutia je kompenzovať injektovaný šum do primárneho vodiča. Ak je do druhého saturačného vinutia vložený ten istý priebeh ako do prvého, ale v opačnej polarite, prúdy indukované v primárnom vodiči budú rovnaké s opačnou polaritou, čím sa vzájomne vykompenzujú. [12]

Charakteristikami takéhoto typu senzora podľa [12] sú maximálny špičkový prúd 1000 A, primárny menovitý prúd 700 A, šírka pásma DC – 100 kHz, napájacie napätie 10 – 30 VDC, prevod 1:1000.

1.6 Magnetorezistívny prúdový senzor

Senzor využíva, ako vypovedá názov metódy, magnetické pole generované prechodom prúdu cez meraný vodič. Magnetorezistívny materiál vplyvom vonkajšieho magnetického poľa mení svoju rezistivitu, ktorej meraním je následne možné určovať prúd. Magnetorezistívne materiály sú citlivejšie ako Hallova sonda. [2]

1.6.1 Fyzikálny princíp

Magnetorezistivita je zmena elektrického odporu látky vyvolaná vonkajším magnetickým poľom. Podľa orientácie magnetického poľa a prúdu hovoríme o pozdĺžnom alebo priečnom magnetorezistívnom efekte. Pozdĺžny efekt nastáva, keď sú vonkajšie magnetické pole a prebiehajúci prúd cez magnetorezistívny materiál paralelné. Priečny naopak nastáva, keď sú tieto zložky na seba kolmé.

Poznáme niekoľko magnetorezistívnych efektov:

Anizotropická magnetorezistivita

(AMR) sa vyskytuje vo všetkých feromagnetických materiáloch, najvyužívanejší býva permalloy. Aplikáciou vonkajšieho magnetického poľa sa mení rezistivita v závislosti na uhle so smerom toku prúdu. V magnetických látkach sa na vodivosti podieľajú najčastejšie hybridizované elektróny z 3d a 4s orbitálov. Orbitál 3d nie je plne naplnený

a elektróny z orbitálu 4s preskakujú do 3d orbitálu pri vystavení magnetickému poľu, čím je ovplyvnená vodivosť materiálu. [13]

Z mikroskopického hľadiska je možné odlíšiť niekoľko rôznych zdrojov spôsobujúcich magnetickú anizotropiu.

- **Magnetokryštalická anizotropia:** smerová závislosť magnetických vlastností kvôli kryštalickej štruktúre vzorky.
- **Tvarová anizotropia:** smerová závislosť magnetických vlastností kvôli vonkajšiemu tvaru vzorky.
- **Magnetoelastická anizotropia:** Pnutie spôsobuje zmenu magnetických vlastností v materiáli.

Magnetizácia je vo feromagnetickom materiáli usporiadaná orientovaná v rámci domén. Tieto domény ale majú smer magnetizácie v rámci materiálu orientovaný náhodne. Pri tenkých vrstvách feromagnetického materiálu sú domény rozložené v rovine. Zjednodušene tak môžeme magnetorezistivitu považovať za 2D jav. Zmena rezistivity tenkej vrstvy tak závisí na uhle medzi smerom toku prúdu a orientáciou svojej vlastnej magnetizácie, ktorá môže byť ovplyvnená externým magnetickým poľom. Zmena rezistivity je pri tomto zjednodušení popísaná rovnicou (1.20)

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cos^2 \theta \quad (1.20)$$

kde θ je uhol medzi smerom toku prúdu a smerom vlastnej magnetizácie a ρ je rezistivita materiálu. ρ_{\perp} je hodnota pri $\theta = 90^\circ$ a ρ_{\parallel} je hodnota pri $\theta = 0^\circ$. Maximálna zmena rezistivity oproti základnej rezistivite $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$ je do 2%. [13] [14]

Obria magnetorezistivita

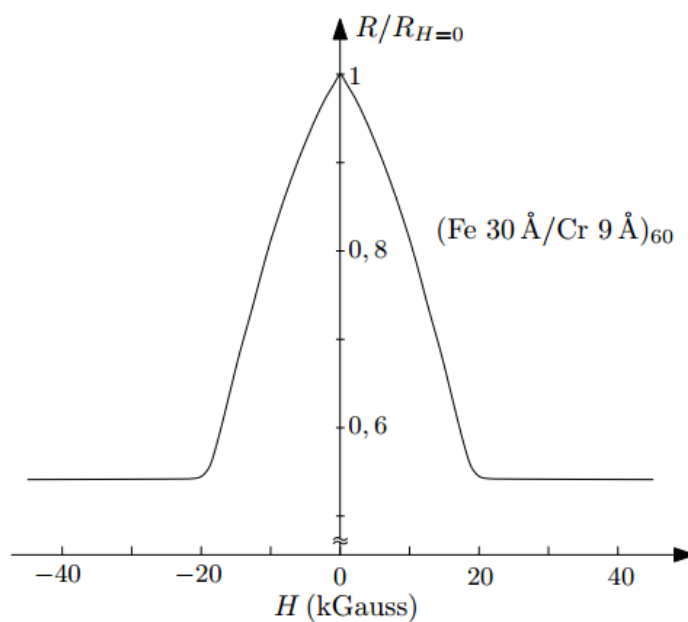
(Giant Magnetoresistance - GMR) je jav vyskytujúci sa na tenkovrstvých materiáloch pozostávajúcich striedavo z feromagnetických a nemagnetických vodivých vrstiev. Feromagnetické vrstvy môžu byť usporiadané paralelne alebo antiparalelne, teda ich magnetické momenty sú buď v rovnakom smere alebo v obrátenom. Celková rezistivita je malá v prípade paralelného usporiadania a veľká v prípade antiparalelného usporiadania. [15]

Elektrická rezistivita je výrazne ovplyvnená rozptylom elektrónov vo feromagnetickom materiáli. Ten je zložený z kryštalograficky rovnakých atómov s nenulovým magnetickým momentom. Rozptyl elektrónov je závislý na spine elektrónu a magnetických momentoch. [15]

Stredná voľná dráha elektrónu so spinom \uparrow a spinom \downarrow je rôzna, líši sa v jednotkách až desiatkach nm. Štruktúra feromagnetikum - nemagnetický materiál - feromagnetikum, pre ktoré platí:

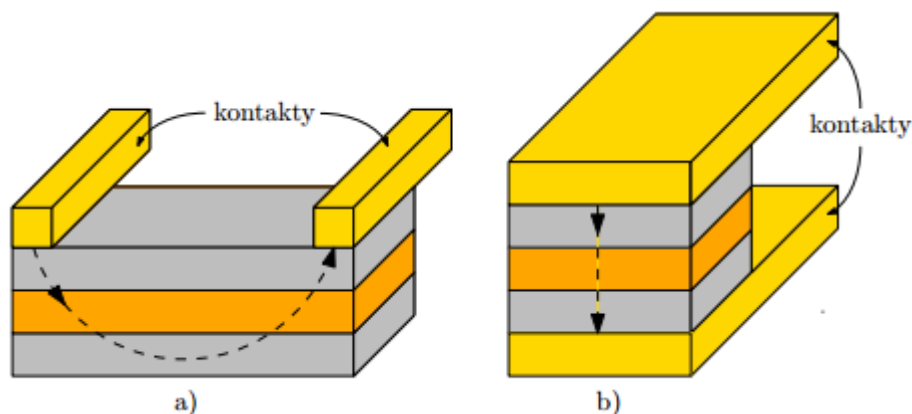
$$\lambda_{\uparrow} > t_F > \lambda_{\downarrow} \quad (1.21)$$

kde λ_{\uparrow} a λ_{\downarrow} je stredná voľná dráha elektrónu so znázorneným spinom a t_F je hrúbka feromagnetickkej vrstvy, vykazuje jav magnetorezistivity. Ak má magnetizácia feromagnetických vrstiev rovnaký smer, prechádzajú medzi nimi elektróny so spinom \uparrow ľahko a elektróny so spinom \downarrow sú rozptýlené. Teda časť elektrónov prechádza s malým odporom, druhá časť s veľkým odporom. Ak je smer magnetizácie antiparalelný, elektróny s oboma spinmi sú rozptýlené. Všetky elektróny tak prechádzajú s veľkým odporom. Obria magnetorezistivita je teda jav, pre ktorý je príznačná závislosť odporu materiálu na orientácii magnetizácie vo feromagnetických vrstvách. Externým magnetickým poľom sa mení smer magnetizácie feromagnetických vrstiev, a tým aj rezistivita materiálu. Často používaná kombinácia materiálu je Fe-Cr, kde železo je feromagnetický materiál a chróm nemagnetický materiál. Táto štruktúra je prirodzene antiparalelne magnetizovaná, pričom vplyvom externého magnetického poľa sa domény natáčajú a štruktúra stráca na rezistivite. Zmena rezistivity môže dosiahnuť až 50% pôvodnej hodnoty, viď obr. 17. [15]



Obr. 17: Závislosť rezistivity Fe-Cr článku na veľkosti magnetického poľa. [15]

Existujú dva spôsoby usporiadania prúdovodnej cesty – prúd v rovine vzorky (current in plane - CIP) a prúd kolmý na rovinu vzorky (current perpendicular to plane - CPP), ako je znázornené na obr. 18.



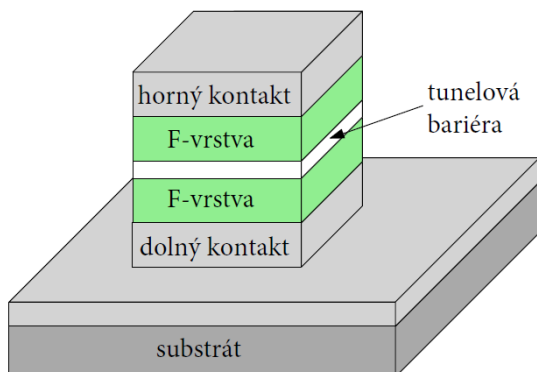
Obr. 18: Usporiadanie prúdovodnej cesty v GMR článkoch, a) CIP, b) CPP. [15]

Geometria CPP sa vyznačuje viac než dvojnásobnou magnetorezistivitou ako CIP štruktúra, je však náročnejšie realizovateľná v praxi.

Tunelová magnetorezistivita

(TMR) je podobný jav ako obria magnetorezistivita. Taktiež obsahuje štruktúru z dvoch feromagnetických vrstiev, rozdelených nemagnetickou vrstvou. Nemagnetická vrstva je však v tomto prípade elektricky nevodivá a pre elektróny predstavuje potenciálovú bariéru. Podľa kvantovej mechaniky majú elektróny nenulovú pravdepodobnosť prechodu touto bariérou aj v prípade, že na to nemajú dostatočnú energiu. Pri hrúbke nevodivej vrstvy 1 – 2 nm je pravdepodobnosť priechodu veľká a elektróny sa buď rozptýlia, alebo prejdú bariérou, v závislosti na orientácii magnetizácie feromagnetických vrstiev. Priechod elektrónov je možný len v CPP konfigurácii, pričom táto štruktúra, znázornená na obr. 19, sa nazýva magnetický tunelový článok (Magnetic Tunnel Junction – MTJ). [15]

Zmena rezistivity dosahuje pri izbovej teplote 604% v materiáli zloženom z Ta / $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ / MgO / $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ / Ta a až 1144% pri teplote 5 K. [16]



Obr. 19: Znázornenie usporiadanie MTJ. [15]

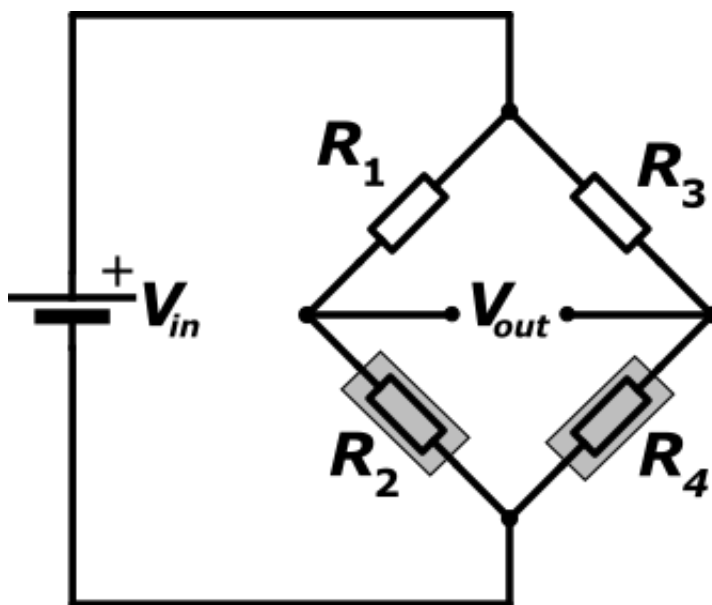
1.6.2 Meranie

Pre meranie magnetických polí sa najčastejšie využívajú GMR a TMR senzory. Je to pre ich maximálnu zmenu rezistivity, ktorá môže dosahovať 50% pri GMR a 600% pri TMR pôvodnej hodnoty, čím senzory získavajú pomerne vysoké rozlíšenie.

GMR senzory merajú v šírke pásma od DC do 1MHz pri teplotách -40°C až 150°C. Senzor je veľmi vhodný pre účely integrácie pre svoju veľkosť – samotný GMR merací element má rozmer 1.3 mm x 0,4 mm. Umiestnený tak môže byť v klasickom SOIC puzdre. [17]

V praxi merací element pozostáva zo štyroch GMR rezistorov formujúcich Wheatsonov mostík, vid' obr. 20. Dva GMR rezistory sú odtienené, teda vplyvom magnetického poľa nemenia svoj odpor. Zvyšné dva sú umiestnené medzi koncentrátor magnetického poľa, aby zmena odporu vplyvom magnetického poľa bola maximalizovaná. Z usporiadania vyplýva, že aplikovaním napätia V_{in} získame výstupné napätie V_{out} , ktoré reprezentuje veľkosť magnetického poľa. Výstupné napätie vypočítame pomocou rovnice (1.22). [17]

$$V_{out} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{in} \quad (1.22)$$

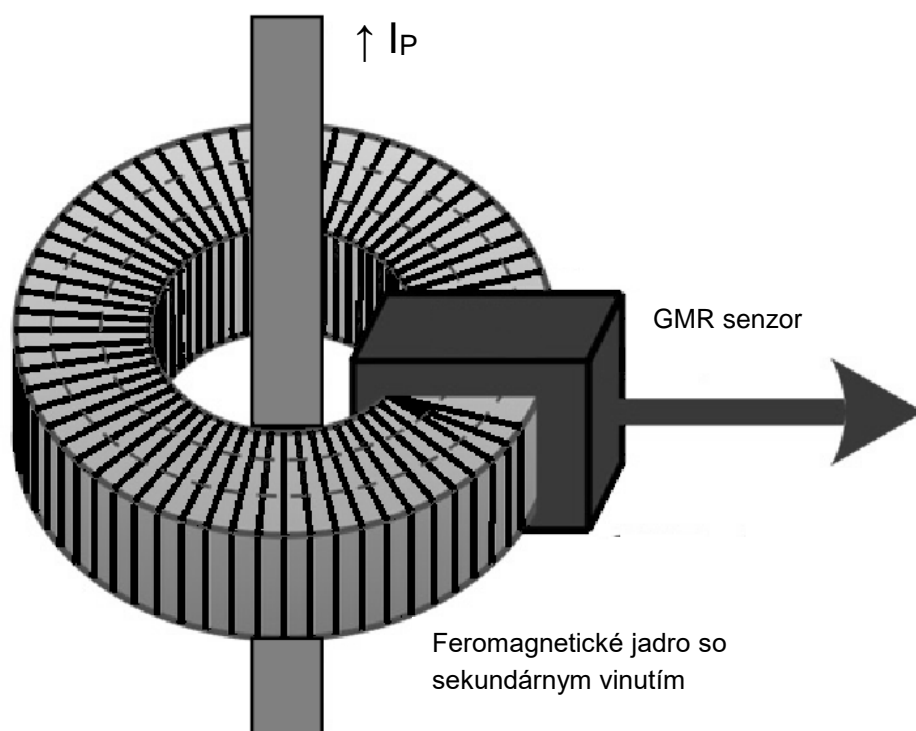


Obr. 20: Znázornenie zapojenia GMR rezistorov do Wheatsonovho mostíka s odtienenými rezistormi R_2 a R_4 . [17]

Podľa [17] bol konštruovaný prúdový senzor vhodný na integráciu, teda bez objemného magnetického koncentrátoru. Pomer zmeny odporu $\Delta R/R$ v tomto prípade dosahoval 7%. Senzor v tejto štúdii ale nedosahoval ideálne meracie parametre na presné

meranie, a mohol tak byť používaný ako nadprúdový senzor.

Iným prístupom zostavenia prúdového senzora je umiestnenie GMR v zapojení Wheatsonovho mostíka do vzduchovej medzery magnetického jadra, podobne ako v prípade Hallovej sondy, ako je znázornené na obr. 21. Na jadre je taktiež navinuté sekundárne vinutie, cez ktoré tečie jednosmerný prúd. GMR senzor totiž nevie identifikovať smer magnetického poľa, ako je možné vidieť z obr. 17, preto je pomocou cievky magnetické pole superponované tak, aby senzor pracoval v oblasti jednej polarity. Toto riešenie potláča hysteréziu a umožňuje meranie oboch polarít. [2]



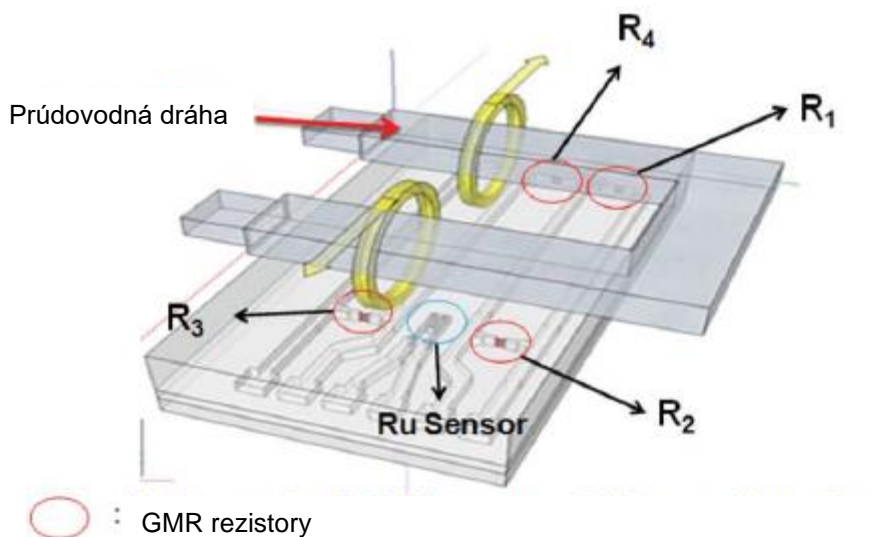
Obr. 21: GMR senzor umiestnený vo vzduchovej medzere feromagnetického koncentratora s navinutým sekundárnym vinutím. [2]

Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere je vypočítaná pomocou rovnice (1.6).

Senzor vytvorený technológiou umiestnenia GMR senzorov v zapojení do Wheatsonovho mostíku, vložených do vzduchovej medzery magnetického jadra, prezentovaný v [2] vykazoval dobré elektrické parametre. Senzor bol napájaný ± 5 V a jeho výstupný napäťový offset bol 5 mV pri nulovej magnetickej indukcii a tiež žiadnom prúde sekundárneho vinutia. Pri prúde sekundárneho vinutia 10 mA dosahoval napäťový offset 149 mV. Pri meraní jednosmernom prúde 0 – 5 A dosahovala citlivosť prúdového senzora 27,9963 mV/A a linearitu 0,99951. Pri rovnakých hodnotách

striedavého prúdu dosahovala citlivosť 28,0064 mV/A a linearita 0,99972. Rozlíšenie senzora je 10 mA pri rozsahu 0 – 5 A. Pomocou jednoduchého teplotného kompenzačného obvodu je možné znížiť teplotnú závislosť z 0,0751% °C⁻¹ na 0,0335% °C⁻¹.

V [18] bol predstavený prúdový senzor založený na TJM magnetorezistívnom materiáli. Senzor bol vytvorený v zapojení Wheatsonovho mostíku, kde každý rezistor bol tvorený zo 114 TJM elementov zapojených v sérii. Senzor bol vytvorený ako sériový, teda je nutné ho sériovo zapojiť do obvodu s meraným prúdom. Prúd tečie cez vodivú cestu v tvare U vytvorenú na doske plošných spojov so zariadením, vid' obr. 22. Meraním bola stanovená hodnota zmeny $\Delta R/R$ na 176%. Pri sekundárnom prúde 1 mA cez mostík bol nameraný výstupný napäťový offset 154 mV. Citlivosť pri meraní ± 10 A rozsahu bola vyhodnotená ako 42,6 mV/A.



Obr. 22: Usporiadanie TJM rezistorov a prúdovodnej dráhy na prúdovom senzore. [18]

2 NEKONVENČNÉ METÓDY MERANIA NAPÄTIA

2.1 Piezoelektrický napäťový senzor

Princíp fungovania napäťového piezoelektrického senzora spočíva vo využívaní nepriameho piezoelektrického javu. Vplyvom napätia vzniká na piezoelektrickom materiáli deformácia, ktorá sa prenáša cez izolovanú oblasť do druhého, mechanicky pripevneného, piezoelektrického materiálu a ten vplyvom deformácie znova generuje napätie. [19]

2.1.1 Fyzikálny princíp

Nepriamy piezoelektrický jav, nepresne označovaný aj ako elektrostriktcia, je jav, kedy sa materiál deformuje vplyvom prítomnosti elektrického poľa. Deformácia materiálu je kvadraticky úmerná veľkosti elektrického poľa. Kladné a záporné ióny – elektrické dipóly, sú v kryštalickej mriežke usporiadané tak, že je elektrické pole z makroskopického hľadiska neutrálne – polarizácia je nulová. Vplyvom elektrického poľa sa táto neutralita naruší, elektrické dipóly majú tendenciu sa natočiť podľa orientácie poľa. V prípade, že je iónom zabránená voľná zmena polohy vplyvom kryštálovej mriežky, nastane elastické pnutie v celom materiáli – deformácia. Po odpojení elektrického poľa sa však materiál nevráti do úplne rovnakej podoby, ale ostane čiastočne polarizovaný - tzv. remanentná polarizácia. [20]

Pri aplikácii striedavého elektrického poľa sa materiál periodicky sťahuje a rozťahuje a ak je frekvencia totožná s vlastnými kmitmi kryštálu, vzniká mechanická rezonancia. V elektrickom obvode s jednosmerným elektrickým poľom sa piezoelektriká správajú ako kondenzátory. [20]

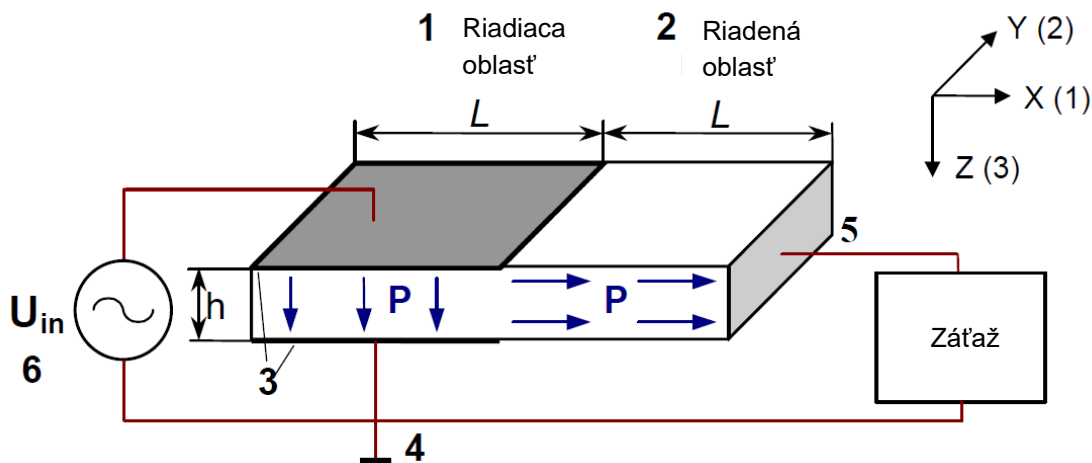
2.1.2 Meranie

Pre meranie napätia sa používajú piezoelektrické transformátory v rezonančnom aj nerezonančnom móde.

Rezonančný piezoelektrický transformátor

Rezonančné piezoelektrické transformátory sú založené na báze piezoelektrického transformátora Rosenovho typu. Konverzia napätia je dosiahnutá mechanickými vibráciami. Transformátor pozostáva z dvoch častí piezoelektrický oblastí, pripevnených pojivom, pričom tieto oblasti sú voči sebe priečne polarizované. Oblasť, na ktorú sa prikladá merané napätie, nazývame riadiacou oblasťou, druhú oblasť, ktorá generuje

transformované napätie, nazývame riadenou oblasťou. Tieto dve oblasti môžu byť vytvorené zvlášť a spojené pojivom, napríklad epoxidom, ale preferuje sa výroba z jedného kusa materiálu. Riadiaca oblasť má v smere polarizácie pokovené strany pre zaistenie správneho kontaktu. Na jednu stranu je pripojené merané napätie, druhá strana je pripojená na zem. V podobnom zmysle je pokovená aj strana riadenej oblasti. Schematicky je transformátor znázornený na obr. 23. [19]



Obr. 23: Schematické znázornenie usporiadania a prevádzky piezoelektrického napäťového transformátora. [19]

Riadiaca a riadená oblasť majú rôzny smer polarizácie, na obr. 23 znázornený šípkami P. [19]

Privedením striedavého napätia (6) na kontakty riadiacej oblasti (3) túto oblasť rozkmitáme v smere polarizácie. Toto mechanické napätie vytvorí pozdĺžne mechanické napätie na riadenej oblasti (2), čím je generované elektrické napätie. V prípade, že by zariadenie nepracovalo v pásme rezonančnej frekvencie, tvorili by sa veľké prenosové straty vo vibráciách. Tento typ transformátora je teda zariadenie s veľmi úzkou šírkou pásma. Transformačný pomer je možné vypočítať pomocou rovnice (2.1). Transformátor v takomto zapojení produkuje výrazne väčšie napätie, ako doň vstupuje, a využíva sa ako vysokonapäťový generátor

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{4}{\pi^2} k_{31} k_{33} Q_m \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

kde k_{31} a k_{33} sú väzobné činitele piezoelektrického materiálu, Q_m je mechanický činiteľ akosti, L/t pomer dĺžky a hrúbky. [19]

Pre meracie účely sa transformátor používa v obrátenom zapojení, vstup je privedený na riadenú oblasť a výstup na riadiacu (podľa vyobrazenia na obr. 23). Vysoké napätie tak je transformované na nízke napätie, avšak stále je potreba udržiavať transformátor

v rezonancii. To je problémom pri sieťovej frekvencii 50 Hz, ktorá je malá na to, aby dokázala transformátor rozkmitať – boli by potrebné veľké rozmery piezoelektrického materiálu. Taktiež nie je možné merať signál s vyšším počtom harmonických zložiek, práve pre veľmi malú šírku pásma rezonancie. Z toho dôvodu je pre meranie vysokého napätia s frekvenciou 50 – 60 Hz použiť nerezonančný piezoelektrický transformátor. [19]

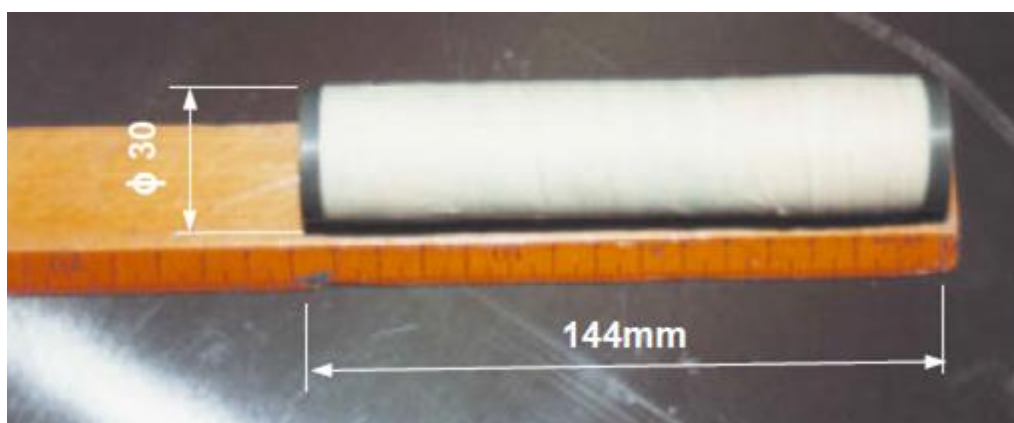
Nerezonančný piezoelektrický transformátor

V prípade nerezonančného piezoelektrického transformátora sa rezonančná frekvencia piezoelektrického materiálu nepribližuje meraným frekvenciám. Vyznačujú sa vysokou linearitou, presnosťou a transformačným pomerom, ktorý nie je ovplyvnený frekvenciou a veľkou šírkou pásma. Medzi nevýhody patria nízke transformačné pomery a nízka účinnosť. [19]

V [19] boli podrobne rozobraté a navrhnuté tri prototypy, z ktorých jeden mal výborné vlastnosti pre použitie ako prístrojový transformátor.

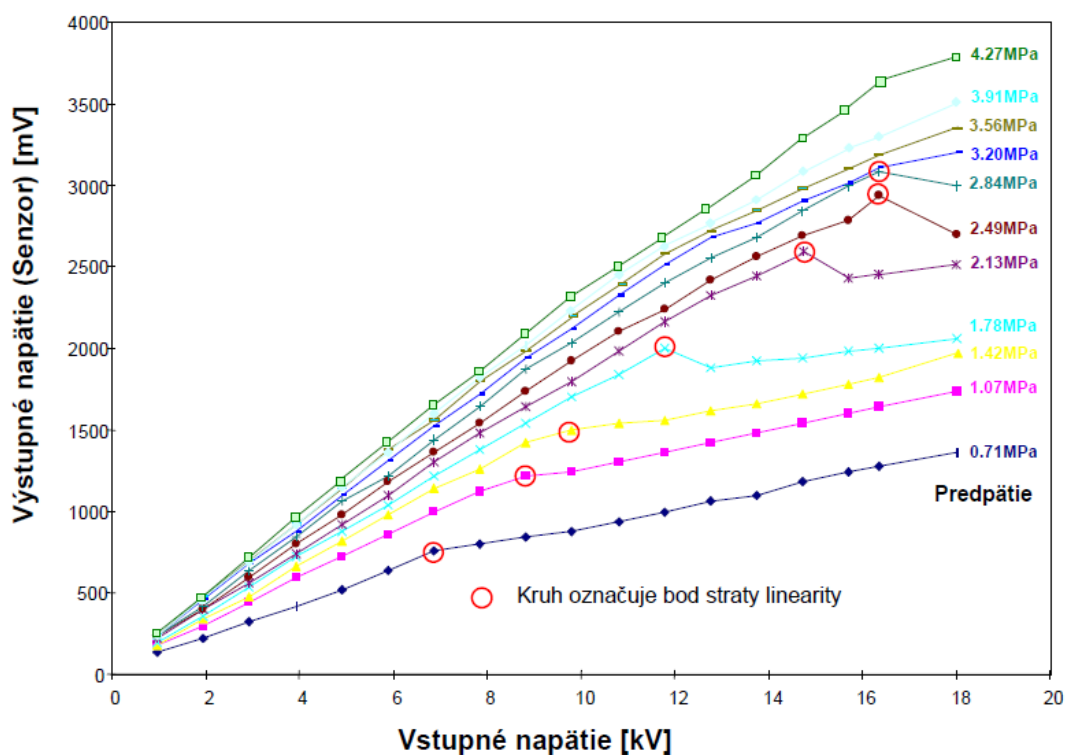
Tento transformátor pozostáva z dvoch mechanicky spojených valcov z piezoelektrického materiálu umiestnených nad seba. Valce sú dielektricky oddelené. Na jeden valec je privedený vysokonapäťový vstup, druhý generuje výstupné nízke napätie. Valec, na ktorý je privedený vstup, využíva nepriamy piezoelektrický jav, teda pod vplyvom napätia sa deformuje – v literatúre označovaný ako budič. Druhý valec využíva priameho piezoelektrického javu, pri jeho samotnej deformácii vplyvom roztlačnosti budiča, generuje napätie. V literatúre je označovaný ako senzor. [19]

Budič bol zostavený z 12 diskov piezoelektrického materiálu PZT-8S, o hrúbke 12 mm a priemere 30 mm, viď obr. 24. Navrhnutý je na maximálne napätie 170 kV (BIL test pre 36 kV transformátor). Maximálna sila vyvinutá pri roztlačnosti je 81,81 mN/V, čo pri 25 kV_{rms} predstavuje 2892,5 N. [19]

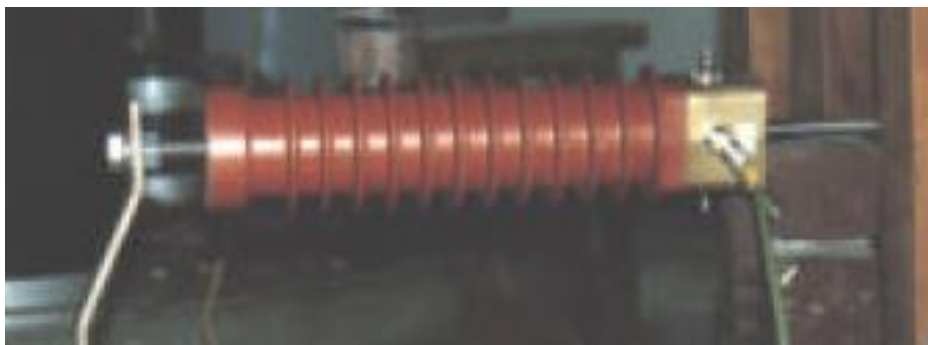


Obr. 24: Budič zostavený z 12 diskov PZT-8 piezoelektrického materiálu. [19]

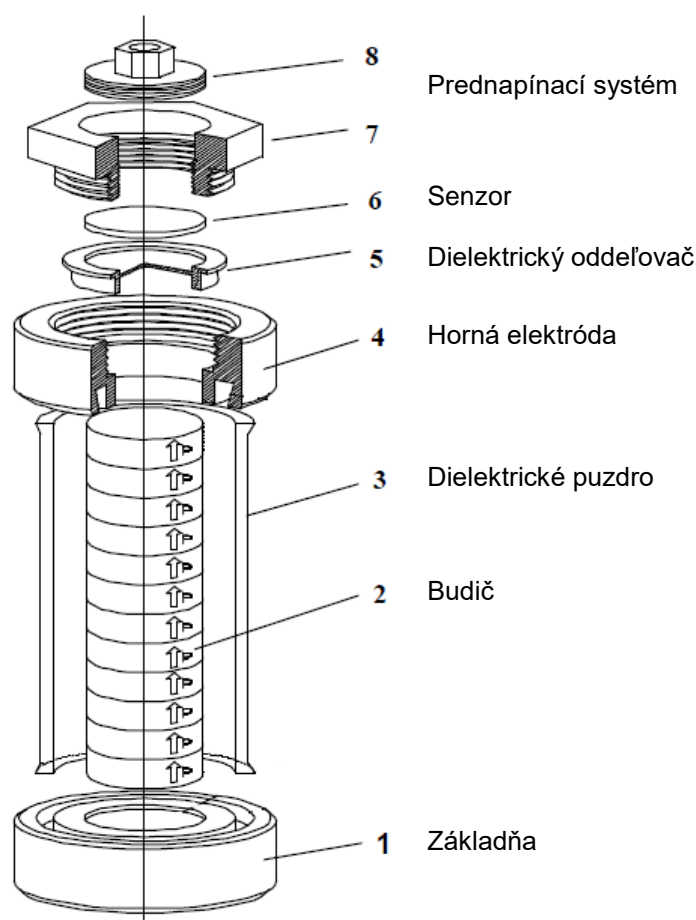
Ako senzor bol použitý keramický materiál SBT ($\text{Bi}_4\text{SrTi}_4\text{O}_{15}$) o priemere 10 mm a hrúbke 2 mm. Oba materiály boli vložené do dielektricky izolovaného puzdra a pomocou napínacej skrutky boli materiály stlačené k sebe na určitú úroveň mechanického predpätia, vid' obr. 26 a obr. 27. Mechanické predpätie má vplyv na linearitu transformátora, jeho citlivosť, vid' obr. 25. [19]



Obr. 25: Graf závislosti vstupnej a výstupnej hodnoty napätia s vyobrazenými hodnotami mechanického predpätia [19]



Obr. 26: Transformátor počas testovania. [19]



Obr. 27: Zloženie transformátora. [19]

Medzi vlastnosti transformátora patrí vysoká citlivosť, stabilita v širokom frekvenčnom rozsahu a teplotách. [19]

2.2 Optické metódy merania napätia

Optické napäťové senzory pracujú na princípe svetlo-priepustného materiálu, ktorý vplyvom elektrického poľa mení svoje vlastnosti a ovplyvňuje lúč svetla prechádzajúci cez neho. Jav, ktorý sa pri tomto druhu merania využíva, sa nazýva Pockelsov efekt. Vplyvom priloženého elektrického poľa sa úmerne mení index lomu materiálu.

2.2.1 Fyzikálny princíp

Vplyvom elektrického poľa sa v opticky anizotropických elektrooptických kryštalických materiáloch mení pozícia, orientácia alebo tvar molekúl. Pockelsov jav pomenúva lineárnu zmenu indexu lomu vplyvom elektrického poľa. V prípade kvadratickej závislosti sa jedná o Kerrov efekt. Zmena indexu lomu je typicky veľmi malá, ale efekt

na svetelnú vlnu, ktorá pri prechode cez materiál prekoná výrazne väčšiu vzdialenosť ako jednu vlnovú dĺžku, je výrazne vyšší. Zvýšenie indexu lomu o 10^{-5} pri svetelnej vlne, ktorá prekoná vzdialenosť 10^5 vlnovej dĺžky (približne 5 cm) spôsobí fázový posun 2π . [21]

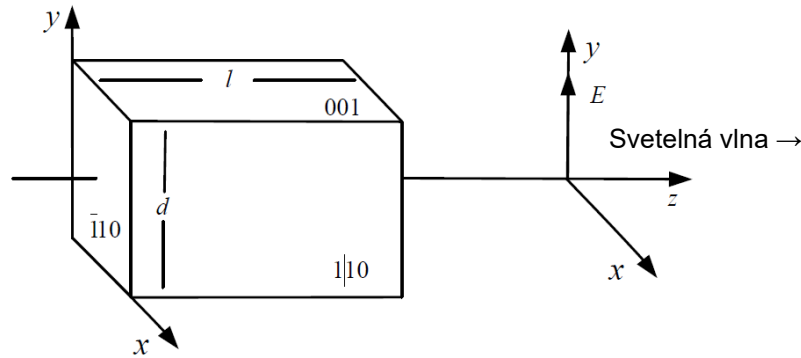
Ak je elektrické pole privedené na kryštál v rovine [001], index lomu je potom daný rovnicami (2.2) - (2.4) pre rôzne smery, ako je znázornené na obr. 28.

$$n_x = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \quad (2.2)$$

$$n_y = n_0 \quad (2.3)$$

$$n_z = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \quad (2.4)$$

kde n_0 je index lomu materiálu bez vplyvu elektrického poľa, γ_{41} je elektrooptický koeficient, a E je veľkosť aplikovaného elektrického poľa. [22]



Obr. 28: Elektrooptický materiál s vyznačenými kryštalografickými rovinami a vyobrazenými osami. [22]

Lineárne polarizovaná vlna prechádza cez kruhový polarizátor, načo vstupuje do elektrooptického materiálu, kde sa zmení na elipticky polarizovanú vlnu. Keď lineárne polarizovaná svetelná vlna prechádza materiálom v smere osi Z, podľa obr. 28, môže byť považovaná za dve kolmé vlny lineárne polarizované v osi X a Y. Prestupom týchto dvoch vln cez materiál vzniká fázový rozdiel, spôsobený rozdielnou dĺžkou optickej cesty. Fázový rozdiel je vyjadrený rovnicou (2.5)

$$\Phi_E = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y - n_x) l = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} l E \quad (2.5)$$

kde λ je vlnová dĺžka a l je dĺžka materiálu, cez ktorý prechádza svetlo. [22]

V prípade, že elektrické pole je dosiahnuté priložením napätia medzi strany kryštálu,

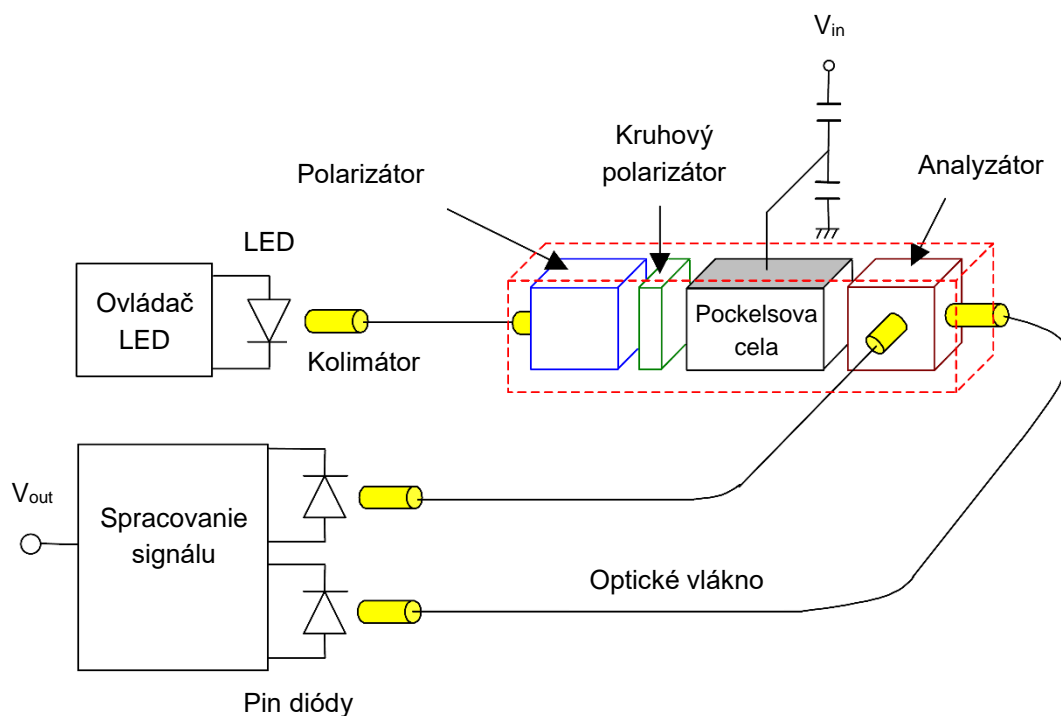
vzniknutý fázový rozdiel je daný rovnicou (2.6)

$$\Phi_V = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} l \frac{V_{in}}{d} \quad (2.6)$$

kde d je hrúbka materiálu v smere vektoru elektrického poľa. [22]

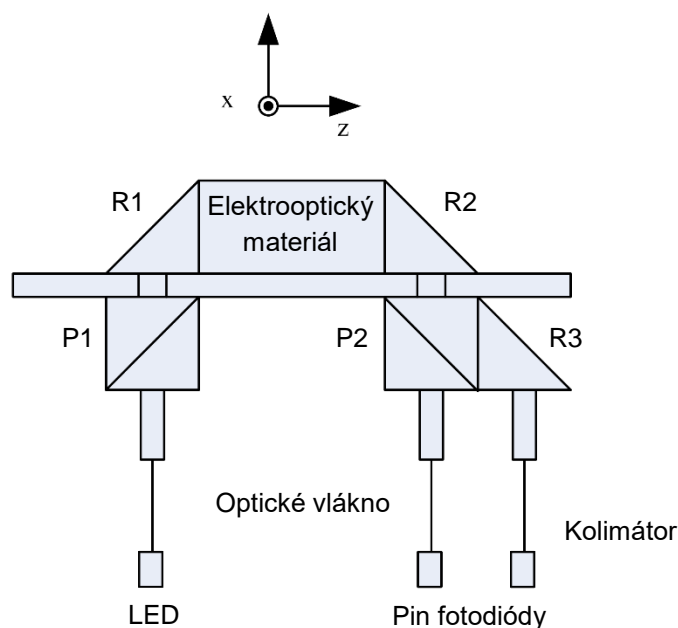
2.2.2 Meranie

Principiálne je senzor znázornený na obr. 29. Svetelný lúč prechádza cez jednotlivé polarizátory do Pockelsovej cely, kde je ovplyvnený fázový posun vlny. Analyzátor vyhodnotí intenzitu svetelného lúča v osi X a Z. [19]

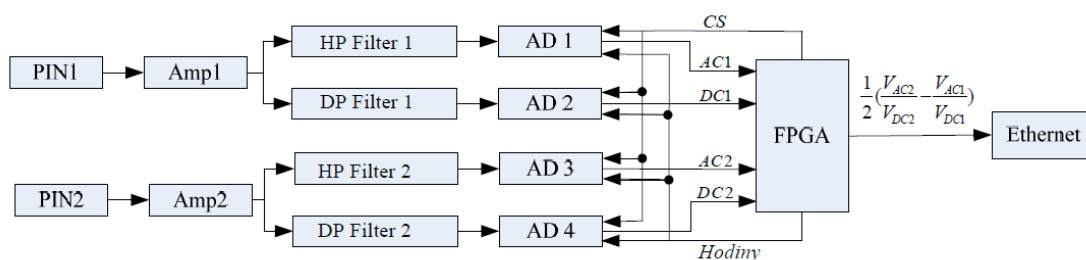


Obr. 29: Schematické zapojenie optického napäťového senzora. [19]

Príklad reálneho senzora je znázornený na obr. 30. Svetelný lúč prechádza z LED zdroja cez optické vlákno a kolimátor do polarizátora (P1), odkiaľ pokračuje cez pravouhlý hranol (R1), kde sa svetlo odrazí do elektrooptického materiálu. V ňom vzniká fázový rozdiel vplyvom elektrického poľa. Svetelný lúč je následne odrazený druhým pravouhlým hranolom (R2) do polarizačného deliča (P2), ktorý vlnu rozdelí na dva komponenty a jeden prepustí do PIN diódy 1 a druhý odrazí cez pravouhlý hranol (R3) na PIN diódu 2. Výsledné intenzity svetla sú vyhodnotené signálovým procesorom zobrazeným na obr. 31. [22]



Obr. 30: Znáznornenie usporiadania reálneho optického napäťového senzora. [22]



Obr. 31: Blokový diagram obvodu spracovania signálu. [22]

Svetelné signály boli PIN diódami konvertované na napätie a zosilnené pomocou operačných zosilňovačov. Frekvenčné filtre dolná a horná priepusť sú navrhnuté tak, aby oddelili jednosmernú a striedavú zložku signálu. Tieto zložky sú následne spracované pomocou AD prevodníkov na digitálnu podobu a spracované pomocou programovateľného hradlového poľa - FPGA. Merané napätie vypočítame podielom jednotlivých zložiek, ako je znázornené rovnicou (2.7). [22]

$$V_{\text{merané}} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{AC2}}{V_{DC2}} - \frac{V_{AC1}}{V_{DC1}} \right) \quad (2.7)$$

Pre výrobu tohto senzora bol ako elektrooptický materiál zvolený $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, s parametrami pre $\lambda = 850 \text{ nm}$: $n_0 = 2,07$; $\gamma_{41} = 1,03 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; rozmery kryštálu $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}$. [22]

Senzor bol nastavený na napätie 10 kV , jeho merací rozsah bol tak $8 - 12 \text{ kV}_{\text{rms}}$. Zmenou tvaru, rozmeru a vzdialenosti medzi elektródami je možné senzor prispôbovať

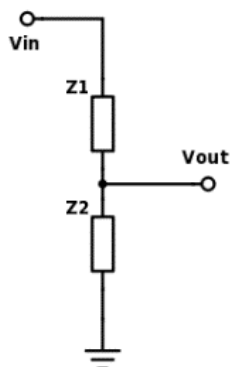
širšej škále napätí. [22]

2.3 Deliče napätia

Za nekonvenčné metódy merania napätia sa považujú aj deliče napätia. Ich využiteľnosť podporuje aj dnešná digitálna technika, ktorá nepotrebuje vysoký výstupný výkon zo senzorov. Ich účelom je znížiť vysoké napätie natoľko, aby ho bolo možné merať klasickými nízkonapäťovými meracími prístrojmi. Deliče napätia môžu byť zložené z rezistorov, alebo kondenzátorov a na základe toho sa delia na rezistívne a kapacitné deliče napätia.

2.3.1 Fyzikálny princíp

Napäťový delič je pasívny lineárny obvod, ktorého výstupné napätie je časť vstupného napätia. Čiastkové napätie je výsledok distribúcie napätia medzi jednotlivé časti deliča. Najjednoduchšie znázornenie napäťového deliča je zobrazené na obr. 32.



Obr. 32: Všeobecné znázornenie napäťového deliča pomocou impedancií.

Z je všeobecná impedancia, ktorá môže byť nahradená impedanciou rezistoru alebo kapacitoru a pomocou ktorej vieme s použitím Ohmovho zákona všeobecne vypočítať výstupné napätie deliča, vid' rovnica (2.8). Pre odporový a kapacitný delič je výpočet zobrazený v rovniciach (2.9) a (2.10).

$$V_{out} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_{in} \quad (2.8)$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (2.9)$$

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in} \quad (2.10)$$

2.3.2 Meranie

Napäťový delič je nesaturačný, bez ferorezonancií a lineárny v celom rozsahu. Výstupným signálom je napätie priamo úmerné meranému napätiu, zvyčajne v pomere 10000:1. Jeho veľkosť je zvyčajne okolo 2,2 V, čo je pre digitálne ochrany vhodná veľkosť. Vo všetkých prípadoch reprodukuje výstupný signál aktuálny časový priebeh tvaru vlny primárneho napätia. [23]

Kapacitný delič

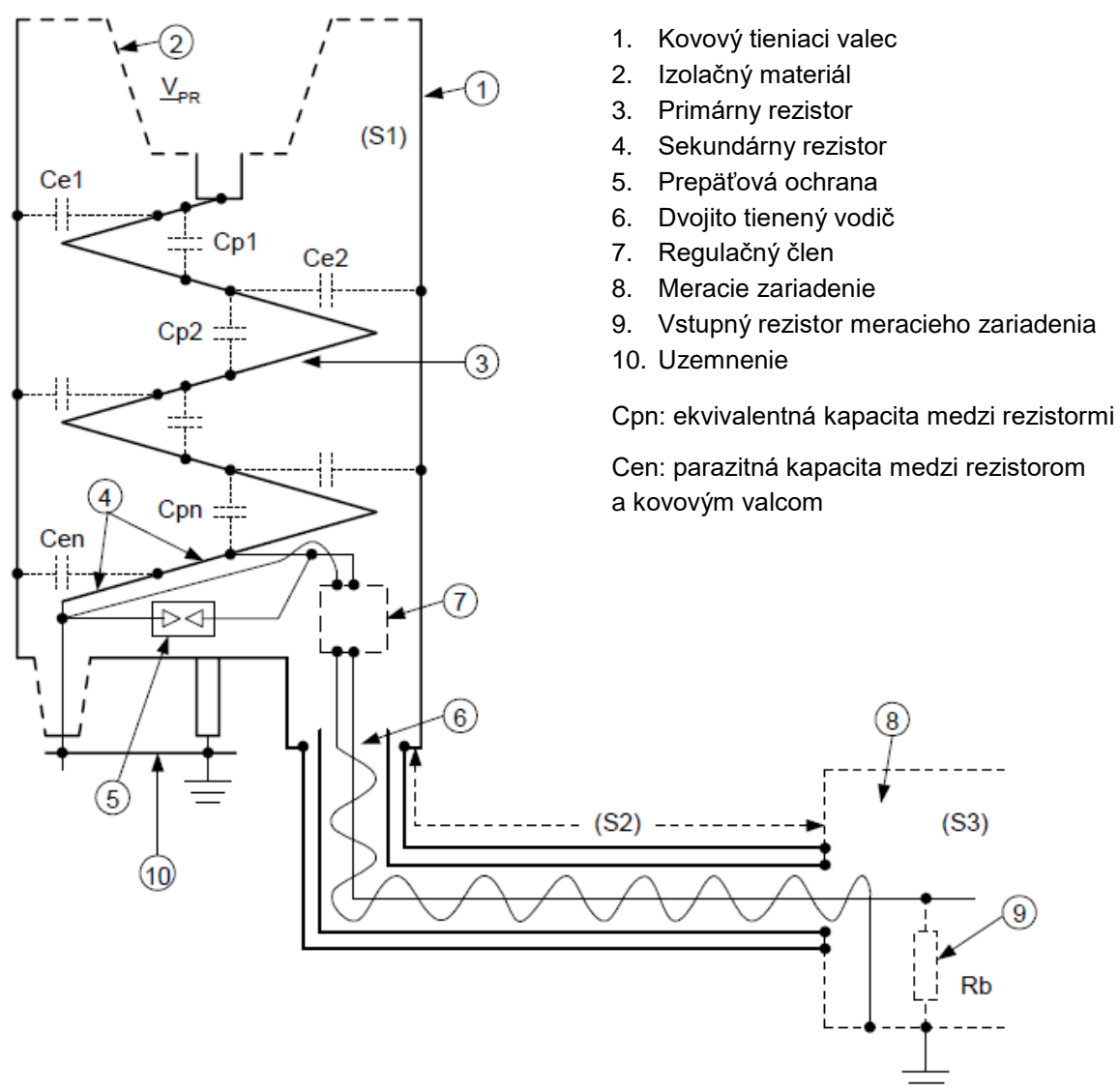
Kapacitný napäťový delič používaný ako napäťový senzor dosahuje triedu presnosti menej ako 0,5%, teda môže byť použitý ako senzor pre presné meranie a nie len ako napäťový indikátor. Kapacita C_1 , na strane vstupného vysokého napätia má obvyčajne hodnotu v rádoch desiatok pF. Kapacita C_2 je potom nastavená podľa požadovaného transformačného pomeru. Pre získanie stabilného transformačného pomeru je výhodné nastavovať kapacitu C_2 na nižšie hodnoty. Na druhú stranu, na príliš nízku hodnotu kapacity kondenzátora C_1 majú vplyv parazitné kapacity z okolitého prostredia a je potrebné tienenie. Dôležitá je taktiež hodnota dielektrickej konštanty ϵ , ktorá by mala mať pre oba kondenzátory rovnakú hodnotu v závislosti na vplyve vonkajších podmienok, najmä teploty. [24]

Výstup senzora je napojený na meracie zariadenie s vysokou vstupnou impedanciou, čím sa spotreba senzora obmedzí na 0,2 VA. Vyhodnotenie nameraných dát je spracovávané výpočtovým systémom založenom na mikroprocesorovej technike. [24]

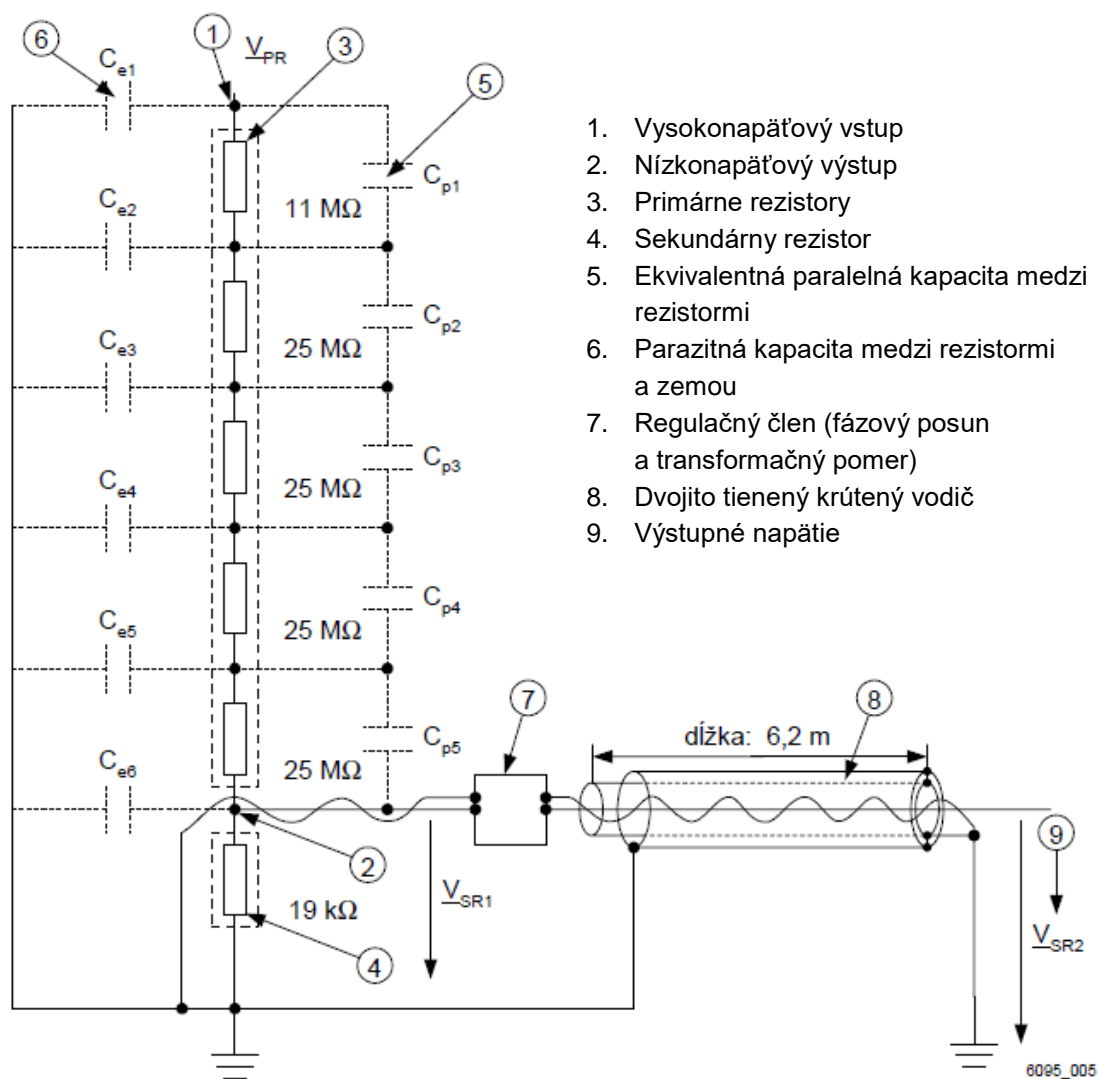
Kapacitný delič je možné použiť len pri striedavom zdroji napätia.

Rezistívny delič

Rezistívny napäťový delič používaný ako napäťový senzor dosahuje triedu presnosti 0,2% a taktiež je vhodný na presné meranie napätia. Senzor sa skladá zo série rezistorov uložených v kovovom valci, ktorý zabraňuje vonkajšiemu rušeniu. Primárne aj sekundárne rezistory sú vyrobené tlstovrstvou technológiou, vyvinuté špeciálne pre túto aplikáciu. Aktívna časť tlstovrstvého rezistoru je chránená proti elektrickému poľu, ktoré existuje medzi povrchom rezistorov a kovovým valcom na nulovom potenciáli. Dôležité je tiež zabezpečiť všetky časti, na ktorých by mohlo indukovať napätie. Z toho dôvodu sú všetky časti tienené a nízkonapäťové vodiče aj krútené. Na obr. 33 je zobrazený rezistívny delič, na obr. 34 jeho náhradný obvod. [25]



Obr. 33: Napäťový delič. [25]



Obr. 34: Náhradný obvod rezistívneho deliča. [25]

Prezentovaný senzor je v literatúre [25] opatrený 111 MΩ primárnym rezistorom a 19 kΩ sekundárnym rezistorom. Bol nastavený pre primárne napätie 11,6 kV s výstupným napätím $3,25 \text{ V}/\sqrt{3}$.

3 ZHRNUTIE A POROVNANIE METÓD

3.1 Zhrnutie metód merania prúdu

Prúdové transformátory sú stále najrozšírenejšie zariadenia na meraní prúdov v tradičných výkonových elektrických systémoch. Ich výhodami sú bezúdržbová

prevádzka, vysoká stabilita a vysoké prieražné napätie. Z princípu fungovania vyplýva, že nemôže byť použitý na meranie jednosmerných prúdov. Medzi ich nevýhody patrí vysoká cena, veľkosť, vysoká váha a obmedzená šírka pásma.

Rogowského cievka, ktorá obsahuje vzduchové jadro, netrpí saturáciou feromagnetického jadra ako prúdový transformátor, a teda dosahuje veľkú šírku pásma s lineárnym priebehom. Medzi ďalšie výhody patrí galvanické oddelenie od vodiča s meraným prúdom, nízka cena, malé rozmery a váha. Medzi nevýhody patrí malá presnosť pri meraní nízkych prúdov a prúdov pri nízkych frekvenciách. Je určená pre meranie vysokých prúdov.

Optické prúdové senzory sa vyznačujú výbornou odolnosťou voči elektromagnetickému rušeniu, výbornými izolačnými vlastnosťami pri vysokom napätí a prúde, a veľkou šírkou pásma. Nevýhodou je v tomto prípade vysoká cena a zložitejšie vyhodnocovacie prístroje. Taktiež sú optické senzory náchylné na teplotné zmeny a v niektorých prípadoch na vibrácie a otrasy.

Prúdový senzor pozostávajúci z Hallovej sondy je v dnešnej dobe najvyužívanejší bezkontaktný spôsob merania prúdu. Medzi výhody patrí nízka cena, malé rozmery a veľká šírka pásma. Nevýhodami sú nízka citlivosť v porovnaní s ostatnými senzormi, malé prieražné napätie, teplotná závislosť a vyššia spotreba vplyvom sekundárneho kompenzačného prúdu.

Fluxgate senzory, alebo senzory so saturačnou cievkou, vykazujú vysokú presnosť. Pre ich veľkosť, vyššiu cenu a vyššiu spotrebu elektrického prúdu sa využívajú prevažne v kalibračných zariadeniach a laboratórnom vybavení.

Magnetorezistívny prúdový senzor sa vyznačuje vysokou linearitou, citlivosťou, malými rozmermi, nízkou cenou, jednoduchou štruktúrou. Medzi nevýhody patrí teplotná závislosť, ktorá musí byť kompenzovaná.

Piezoelektrický MEMS prúdový senzor môže byť využívaný najmä v bezdrôtových senzoroch, Jeho hlavnou výhodou je možnosť napájania samotného senzora prebytočným napätím a prúdom vznikajúcim pri kmitaní jazýčka. Ďalšími výhodami sú možnosť merania na dvojžilovom vodiči, nízka cena a vysoká citlivosť. Nevýhodou je potreba presného umiestnenia senzora do okolia vodiča.

Tab. 1: Vlastnosti prúdových senzorov. [2]

	Prúdový rozsah	Frekvenčný rozsah	Nelinearita	Cena
CT	1 A – 100 kA	0,05 Hz – 10 kHz	0,05%	Vysoká
Rogowského cievka	10 A – 100 kA	0,1 Hz – 100 MHz	0,05%	Nízka
Optické senzory	1 A – 3 kA	DC – 300 MHz	0,20%	Veľmi vysoká
Hallov senzor	10 mA – 35 kA	DC – 1 MHz	0,1% – 0,5%	Nízka
Fluxgate senzor	1 A – 10 kA	DC – 1 kHz	0,001% - 0,5%	Vysoká

Magnetorezistívne senzory	1mA – 10kA	DC – 5 MHz	0,01% - 0,05%	Nízka
Piezoelektrické senzory	60 mA – 50 A	DC - kHz	1%	Nízka

3.2 Zhrnutie metód merania napätia

Podobne ako prúdové transformátory aj napäťové transformátory sú ako konvenčné metódy merania hojne využívané v energetickom priemysle. Transformátory poskytujú výbornú stabilitu a presnosť v určenom prevádzkovom rozsahu, sú bezúdržbové. Obrovskou nevýhodou je jav ferorezonancie, kedy môže vzniknúť rezonančný stav medzi indukčnosťou transformátora a kapacitou vedenia. Ferorezonancia má za následok deštrukciu transformátora, tento jav sa pri ostatných spomenutých senzoroch vôbec nevyskytuje. Skrat sekundárneho vinutia má tiež za následok deštrukciu transformátora, pre tento prípad musia byť použité poistky. Ďalšou nevýhodou sú veľké rozmery, váha, spotreba materiálu a tým aj vyššia cena.

Piezoelektrický napäťový transformátor sa vyznačuje veľkou stabilitou transformačného pomeru v širokej škále frekvencií, od DC po 10 kHz, vysokou citlivosťou a teplotnou stabilitou. Nevýhodou je závislosť transformačného pomeru na pripojenej záťaži.

Napäťový senzor pracujúci na optickom princípe sa vyznačuje veľkou šírkou pásma, pracuje až do niekoľkých MHz. Presnosť je limitovaná iba elektronikou a snímačmi, ktoré vyhodnocujú výstup z optického materiálu. Senzor nevykazuje žiadnu saturáciu pri poruchových stavoch, je imúnny voči elektromagnetickému rušeniu a má malé rozmery. Nevýhodou je vyššia cena.

Napäťové deliče, ako rezistívny, tak aj kapacitný sa vyznačujú vysokou presnosťou, širokým rozsahom meraného napätia, nízkou cenou a malými rozmermi. Rezistívny delič meria s vyššou presnosťou ako kapacitný delič, ale naopak má horšie frekvenčné charakteristiky ako kapacitný. Kapacitný senzor nie je možné používať na meranie jednosmerného napätia. Zároveň má kapacitný senzor problém s vybíjaním zachyteného náboja. Obom senzorom sa mení transformačný pomer v závislosti na záťaži.

4 PRAKTICKÁ ČASŤ

V rámci diplomovej práce bolo na základe vykonanej rešerše rozhodnuté zostrojiť a zmerať charakteristiky prúdového senzora pozostávajúceho z magnetorezistívnych prvkov.

Pri výbere metódy merania prúdu bolo prihliadané k viacerým aspektom. Prvým z nich bola trhovú dostupnosť hotového prúdového senzora. Prúdové senzory, napriek tomu, že sa považujú za nekonvenčné, a sú dostupné na trhu ako hotové výrobky, boli z výberu vyradené. Jednalo sa o Hallov senzor a senzor využívajúci metódu saturačnej cievky.

Ďalším z aspektov bola trhovú dostupnosť komponentov pre prúdový senzor. Nedostupnosť kľúčového komponentu pre zostrojenie prúdového senzora by totiž znamenalo jeho zákazkovú výrobu, čo by malo výrazný vplyv na výslednú celkovú cenu senzora. Z tohto dôvodu boli vylúčené optické metódy a metóda MEMS. Pre obe metódy je síce k dispozícii viacero vedeckých článkov popisujúcich úspešné využitie týchto metód v senzorovej technike, ich kľúčové komponenty však boli vyrábané priamo pre danú aplikáciu či danú štúdiu.

Spomedzi porovnávaných a popisovaných metód merania prúdu uvedených v rešerši tak ostala k dispozícii magnetorezistívna metóda, ktorá v sebe spája oba vyššie uvedené aspekty – nie je dostupná priamo ako prúdový senzor a zároveň sú k dispozícii elektronické súčiastky obsahujúce magnetorezistory.

Zo štúdií týkajúcich sa vytvorenia prúdového senzora pomocou magnetorezistívnej technológie vyplýva, že zostrojenie senzora je možné a taktiež je možné dosiahnuť presné výsledky merania.

4.1 ABB UniGear ZS1

Jedným z cieľov diplomovej práce je zostrojenie prototypu prúdového senzora, ktorý je využiteľný pre vysokonapäťový rozvádzač pre primárnu distribúciu od firmy ABB, vyrábaný vo fabrike ABB v Brne.

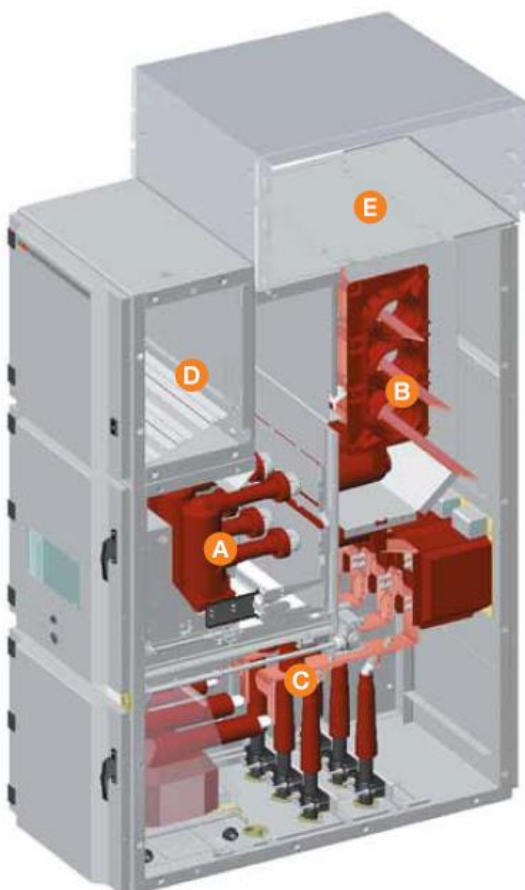
ABB UniGear ZS1 je vzduchom izolované zariadenie, slúžiace na rozvod elektrickej energie vysokého napätia. V základe je možné konštrukciu tohto vysokonapäťového rozvádzača rozdeliť na primárnu časť, teda časť slúžiacu na rozvod elektrickej energie vysokého napätia a nízkonapäťovú časť, slúžiacu predovšetkým na vyhodnocovanie meraných parametrov z primárnej časti a zabezpečovanie ochranných funkcií. Primárna a nízkonapäťová časť sú od seba navzájom oddelené kovovou prepážkou. [26]

Primárna časť sa zároveň delí na tri oddelené priestory.

- **Prípojnicový priestor** – slúži na elektrické prepojenie medzi jednotlivými rozvádzačmi ZS1, ktoré takto spojené formujú komplexnú rozvodňu.
- **Káblový priestor** – priestor v ktorom sa pripájajú káble buď privádzajúce elektrickú energiu vysokého napätia do rozvádzača, alebo káble slúžiace na rozvod elektrickej energie vysokého napätia do iných miest.
- **Vypínačový priestor** – priestor v ktorom sa nachádza vypínač, ktorý spája alebo rozpája obvod medzi káblovým a prípojnicovým priestorom, ktoré sú elektricky spojené s vypínačovým priestorom.

Jednotlivé priestory primárnej časti sú navzájom taktiež oddelené kovovou prepážkou. Prípojnicový a káblový priestor sú elektricky spojené s vypínačovým priestorom.

Štandardná rozvodňa sa skladá z viacerých rozvádzačových polí, pričom aspoň jedno pole slúži na prívod elektrickej energie a ostatné slúžia ako vývody, alebo majú iné funkcie.



Obr. 35: Zobrazenie jednotlivých častí rozvádzača UniGear ZS1. A) vypínačový priestor, B) prípojnicový priestor, C) káblový priestor, D) nízkonapäťová časť, E) Odfukový kanál pre odvod plynov vzniknutých pri výboji. [26]

Firma ABB využíva pri svojich najpredávanejších vysokonapäťových rozvádzačoch UniGear ZS1 škálu menovitých prúdov, na ktoré je konkrétny rozvádzač stavaný. Jednotlivé menovité prúdy, na ktoré môže byť rozvádzač konštruovaný sú zobrazené v tab. 2.

Tab. 2: Menovité prúdy vysokonapäťových rozvádzačov ABB UniGear ZS1. [26]

	Pre menovité napätie 7,2 – 17,5 kV	Pre menovité napätie 24 kV
Menovitý prúd (A)	630	630
	1250	1250
	1600	1600
	2000	2000
	2500	2300
	3150	2500
	3600	2500
	4000	3150

4.1.1 Umiestnenie senzora v rozvádzači

Prúdový senzor by po úpravách konštrukcie bolo možné umiestniť do blízkosti častí rozvádzača cez ktoré preteká prúd. Existuje viacero variánt umiestnenia senzora v rozvádzači:

- V okolí medených pásov spájajúcich jednotlivé priestory rozvádzača.
- Vo vypínačovom priestore v okolí pólov vypínača.
- Ako samostatné zariadenie pripojené do hlavného obvodu.

Umiestnenie v okolí medených pásov

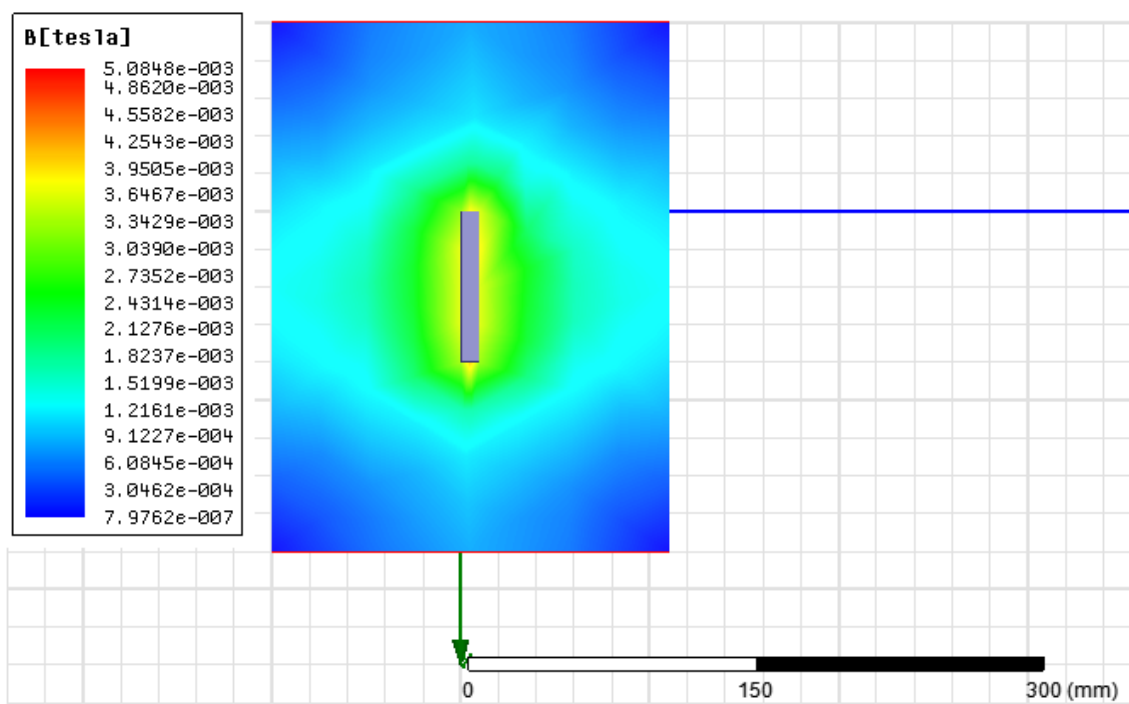
Jednotlivé časti rozvádzača ABB sú elektricky spojené pevnými medenými vodičmi, takzvanými pásmi. Magnetorezistívny senzor je vďaka svojej veľkosti možné umiestniť takmer kdekoľvek do blízkosti medených pásov. V rozvádzači UniGear ZS1 sa však využíva veľké množstvo rozmerových variánt medených pásov, a to na základe šírky panelu, menovitého prúdu a iných parametrov. Rozdiel je predovšetkým v šírke medeného pásu, ktorá sa obvyčajne pohybuje v rozmedzí od 50 mm do 100 mm. Rozdiel je taktiež v tvare medených pásov. Pri vyšších menovitých prúdoch rozvádzača sa tiež používajú zdvojené pásy.

Pre zistenie závislosti v rozmeroch pásu na magnetické pole vytvorené v jeho okolí, bol odvodený matematický vzorec (4.1)

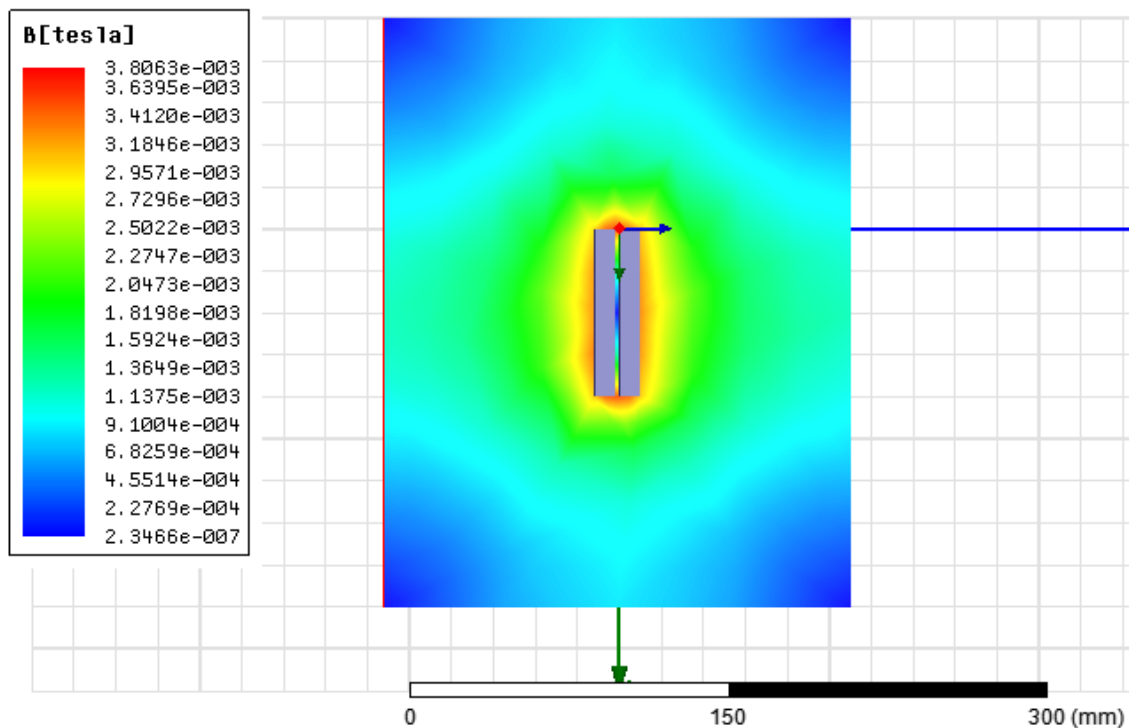
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi w} 2 \arctg\left(\frac{w}{2R}\right) 2 \sin\left(2 \arctg\left(\frac{L}{2R}\right)\right) \quad (4.1)$$

kde w je šírka medeného pásu, L je jeho dĺžka a R vzdialenosť od stredu pásu. Tento vzorec vychádza z Biot-Savartovho zákona. Taktiež bola prevedená simulácia v programe Ansys Maxwell, ktorý je určený na simuláciu elektromagnetických polí. Podľa simulácií vytvorených programom Ansys Maxwell a taktiež výpočtami bolo zistené, že šírka medených pásov má vplyv na magnetické pole v okolí pásu, pri rovnakom prúde pretekajúcom cez vodič. Rozdiely vo veľkosti magnetickej indukcie nie sú veľké, ale rozhodne nie zanedbateľné.

V simulácii boli simulované vodiče prúdu o priereze s hrúbkou 10 mm a šírkou v rozmedzí 50 mm až 100 mm. Taktiež boli simulované zdvojené pásy o priereze každého 10 x 80 mm, s 1 mm medzerou medzi nimi. Grafické znázornenie jednotlivých simulácií je možné vidieť na obr. 36 a obr. 37. Simulovaný prúd pretekajúci cez vodiče bol 500 A, hodnota magnetickej indukcie bola odčítaná vo vzdialenosti 50 mm od stredu vodiča.



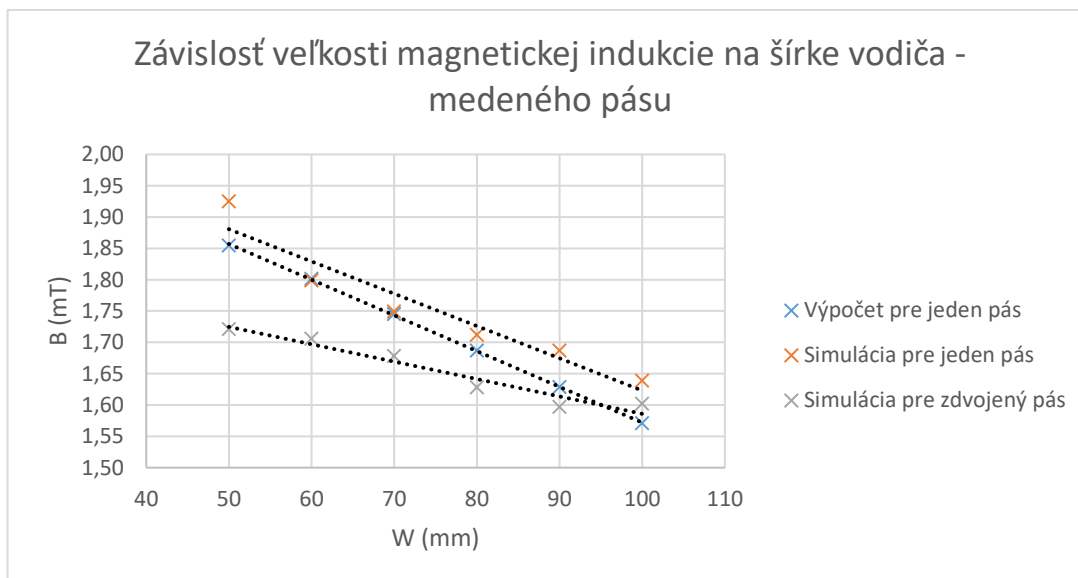
Obr. 36: Simulácia magnetického poľa v okolí medeného vodiča s pričným prierezom 10 x 80 mm. Vodičom prechádza prúd o veľkosti 500 A.



Obr. 37: Simulácia magnetického poľa v okolí zdvojených medených vodičov, každý o rozmeroch prierehového prierezu 10 x 80 mm. Vzduchová medzera medzi pásmi je 1 mm. Každým z vodičov prechádza prúd o veľkosti 250 A.

Na obr. 38 sú znázornené výsledky výpočtu a simulácie. Napriek tomu, že simulované hodnoty netvorí dokonale lineárny priebeh, je z grafu markantné znižovanie veľkosti magnetickej indukcie s rastúcou šírkou pásu, pri rovnakej vzdialenosti od stredu pásu. Jednotlivé hodnoty výsledkov simulácie neležia na jednej priamke z dôvodu techniky výpočtu simulácie. Metóda konečných prvkov, použitá v simulácii, počíta hodnoty v jednotlivých bodoch zosieťovaného modelu. Pri zmene šírky simulovaného vodiča sa musí prepočítať jeho sieť, čím vzniknú drobné odchýlky ktoré sa prejavajú v mierne odlišných hodnotách.

Z uvedeného vyplýva, že použitie senzora merajúceho magnetickej indukciu v okolí pásu, pre aplikáciu v rozvádzači UniGear ZS1, je technologicky možné, ale náročné, pretože by bolo potrebné vytvoriť prevodné charakteristiky pre množstvo rôzne širokých pásov. Okrem šírky pásov má na výsledné magnetické pole vplyv aj vytvarovanie samotného pásu. Množstvo rôznych tvarov tak znásobí počet možností, pre ktoré by bolo nutné vytvoriť prevodnú charakteristiku senzora.



Obr. 38: Výsledky výpočtu a simulácií veľkosti magnetickej indukcie v závislosti na šírke medeného pásu.

Umiestnenie vo vypínačovom priestore v okolí pólov vypínača

Senzor je taktiež možné umiestniť na pripájaciu komoru pólov vypínača – teda miesto kde sa vypínač pripája do elektrického obvodu rozvádzača. Toto miesto je použité ako umiestnenie prúdového senzora založeného na princípe Rogowského cievky, ktorý sa v tomto type rozvádzačov ABB používa. Unifikované rozmery pólov vypínačov generujúce magnetické pole v ich okolí tak predurčujú toto umiestnenie senzoru k lepšej presnosti. Stále však existuje viacero variánt prevedenia pripájacích pólov vypínača, v závislosti na menovitom prúde a menovitom napätí rozvádzača. Rôzne rozmery pólov vypínača zapríčinia rozdielny výstup zo senzora pri rovnakom prúde. V takomto prípade je nutné výstup zo senzora prepočítat korekčným faktorom. Nakoľko sú však póly vyrábané v obmedzenom množstve variánt, nie je vytvorenie tabuľky s korekčnými faktormi komplikované.

Umiestnenie samostatné zariadenie pripojené do hlavného obvodu

Umiestnenie senzora do zariadenia pripojiteľného do hlavného obvodu ponúka najmä vyššiu presnosť v podobe jednotného umiestnenia magnetorezistívneho senzora pri unifikovanom vodiči, ktorý spĺňa najvyššie menovité prúdy a napätia využívané rozvádzačom. Takéto zariadenie sa dá zároveň použiť ako podporný a konštrukčný prvok pre prichytenie a upevnenie medených pásov o telo rozvádzača. V rozvádzačoch ABB slúži prúdový transformátor zároveň ako konštrukčný a podporný prvok pre medené pásy. V prípade neprítomnosti prúdového transformátora je využitý tzv. dummy transformátor, ktorý má rozmery prúdového transformátora. Z elektrického hľadiska má funkciu vodiča, čiže je možné umiestnenie magnetorezistívneho senzora.

Je však otázne, či bude do budúcnosti rentabilné vytvárať masívny epoxidový blok

obsahujúci senzor niekoľkonásobne menších rozmerov. A to hlavne v prípade ústupu využívania prístrojových transformátorov, ako hlavného prostriedku pre meranie vysokých prúdov. Medzi nevýhody taktiež patrí nutnosť zapojiť takto skonštruovaný merací prístroj do prúdovodnej dráhy.

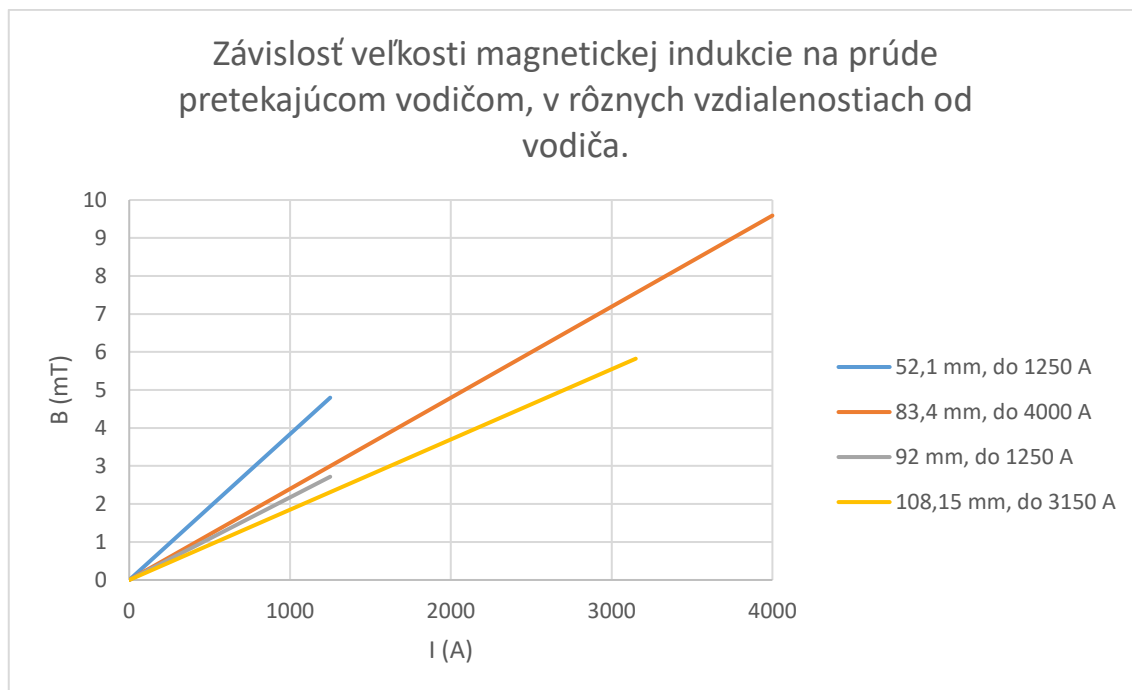
4.2 Magnetorezistívny senzor

Na základe výpočtov veľkosti magnetickej indukcie v okolí vodiča cez ktorý preteká prúd, bol vyhľadávaný magnetorezistívny senzor, ktorý by spĺňal požadovaný interval hodnôt. Hodnoty magnetickej indukcie potrebné pre výber senzora boli počítané na základe parametrov menovitého prúdu v rozvádzačoch UniGear ZS1 a na základe rozmerov prúdového senzora, ktorý sa v ABB pre tieto rozvádzače používa a upevňuje na komory kontaktov vypínača. Rozmery, konkrétne vzdialenosť od stredu vodiča, bola zosúladená s rozmermi používaného senzora z dôvodu využiteľnosti už existujúcich riešení. Pôvodné senzory boli navrhnuté tak, aby súhlasili s ostatnými komponentami rozvádzača, a rozvádzač bol takto typizovaný. Výberom rovnakých rozmerov tak je možné zabrániť zmenám ostatných komponentov v rozvádzači. Pre UniGear ZS1 sa používajú štyri rozmery prúdového senzora – ABB KECA 80. Tie sú ešte rozdelené pre použitie v rozvádzači, na základe menovitého napätia a prúdu. Jednotlivé hodnoty napätia a prúdu vzťahujúce sa k rozmeru senzora, vzdialenosti od stredu vodiča k senzorickej časti, je možné vidieť v tab. 3. Tieto limitné hodnoty nie sú parametrami daného senzora, ale sú parametrami vyplývajúcimi z použitia v rozvádzači.

Tab. 3: Hodnoty maximálneho prúdu a napätia vzťahujúce sa k rozmeru senzora – vzdialenosti stredu vodiča od snímacej časti.

Senzor	Vzdialenosť k stredu vodiča (mm)	Menovitý prúd (A)	Menovité napätie (kV)
KECA 80 C104	52,10	1250	17,5
KECA 80 C165	83,40	4000	17,5
KECA 80 C184	92,00	1250	24,0
KECA 80 C216	108,15	3150	24,0

Pre tieto hodnoty bola počítaná magnetická indukcia v okolí vodiča. Na obr. 39 je zobrazená závislosť veľkosti magnetickej indukcie v závislosti na prúde vo vodiči pri určitých vzdialenostiach od stredu vodiča. Taktiež sú znázornené maximálne prúdy, na ktoré je rozvádzač pri danom rozmere senzora konštruovaný.



Obr. 39: Závislosť veľkosti magnetickej indukcie na prúde pretekajúcom vodičom, v rôznych vzdialenostiach od vodiča.

Na základe vypočítaných hodnôt bol vybraný magnetorezistívny senzor, ktorý by bol schopný takéto magnetické pole zaznamenať.

Magnetorezistívne senzory komerčne predáva približne desiatka spoločností. Niektoré boli priamo určené ako prúdové senzory, ich technológia však spočívala v umiestnení prúdovodnej dráhy popod netienené magnetorezistory priamo na čipe, čo zamedzovalo použitiu pre snímanie magnetického poľa voľne v okolí vonkajšieho vodiča, cez ktorý tečie prúd. Takáto súčiastka by totiž mohla byť zvonka tienená a neposkytovala by žiadne, prípadne skreslené výsledky. Zároveň by nebolo možné použiť štandardné riešenie takto tvorenej súčiastky – nechať prúd pretekať cez vytvorenú prúdovodnú dráhu na čipe. Maximálne hodnoty meraného prúdu pre takéto súčiastky boli rádovo jednotky až desiatky ampérov.

Na základe toho boli vybrané súčiastky, ktoré boli zostrojené iba ako senzory magnetického poľa, bez úpravy na špecifickú aplikáciu. Jedinou firmou, ktorá ponúkala celú škálu rozsahov magnetorezistívnych senzorov bola firma NVE. Od tejto spoločnosti boli vybrané senzory s označením AA003-02E a AA005-02E. Ich špecifikácia je zobrazená v tab. 4.

Tab. 4: Parametre vybratých magnetosenzorov. [27]

Senzor	Lineárny rozsah (mT)		Saturácia (mT)	Citlivosť (mV/V) pri zmene o 0,1 mT		Max. nelinearita	Max. hysterezia	Typický odpor (kΩ)
	Min.	Max.		Min.	Max.			
AA003-02E	0,2	1,4	2	2	3,2	2%	4%	5
AA005-02E	1	7	10	0,45	0,65	2%	4%	5

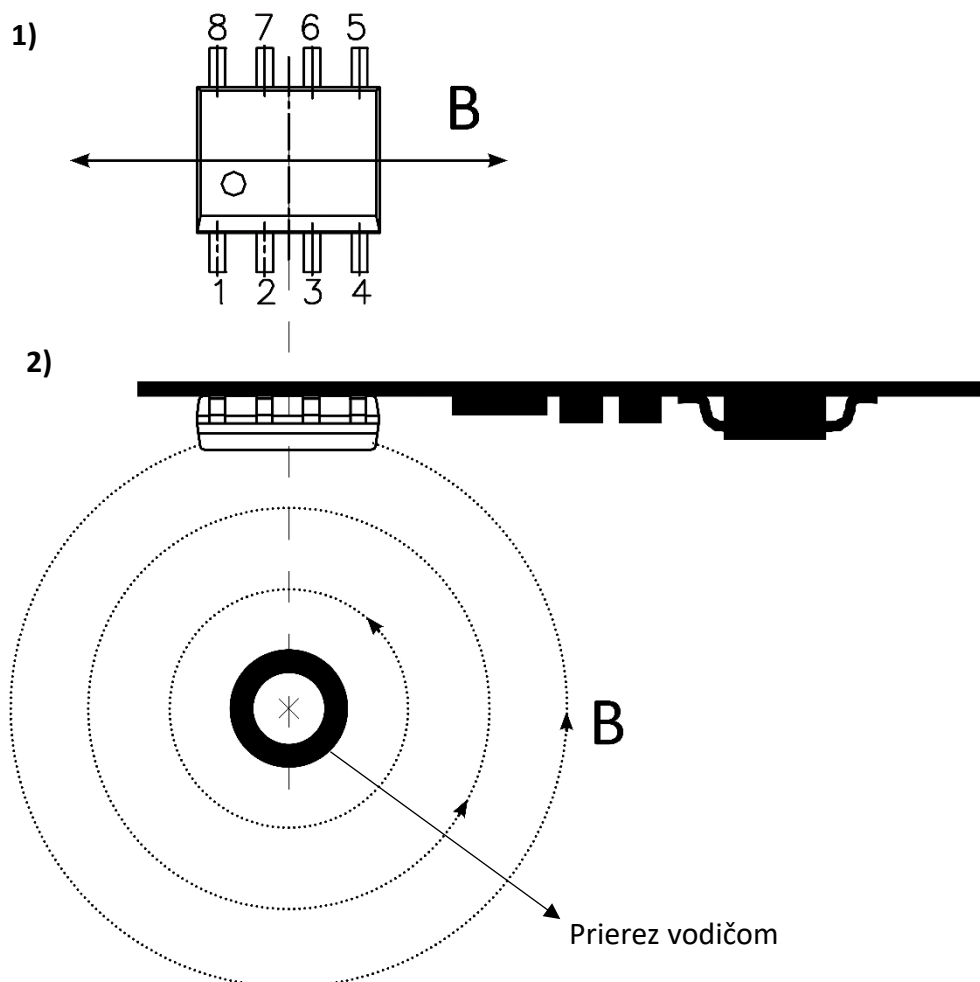
Magnetorezistívny senzor sa skladá zo štyroch magnetorezistívnych prvkov zapojených do Wheatsonovho mostíka, pričom dva rezistory sú tienené a magnetické pole na ne nemá vplyv. Senzor je schopný zaznamenať iba absolútnu hodnotu magnetického poľa, nevie rozlíšiť jeho polaritu. Sensory dokážu pracovať do frekvencie 1 MHz. [27]

Výhodou magnetorezistívnych senzorov je, že sa vplyvom veľkosti magnetického poľa nedokážu zničiť. Je tak možné skombinovať senzory s rôznymi rozsahmi a tak pokryť väčšiu časť spektra, ktoré je potrebné merať. [27]

4.3 Návrh a výroba prúdového senzora

Vytvorené boli dva druhy prúdového senzora, jeden so súčiastkou AA003-02E a druhý s AA005-02E. Súčiastka je dodávaná v puzdre SOIC-8, pričom zapojené sú štyri piny, dva pre napájanie a dva pre výstup. Napájacie napätie môže byť podľa katalógového listu v rozmedzí 1 až 24 V. [27]

Na obr. 40 je znázornený smer citlivosti magnetorezistívnej súčiastky NVE na vektor magnetickej indukcie. Citlivosť senzora na veľkosť magnetického poľa v smere jeho stredovej osi, rovnobežne s polohou pinu 1 a 4. Zároveň je znázornené umiestnenie senzora, umiestneného na DPS, nad vodičom cez ktorý preteká prúd.



Obr. 40: 1) Znáznorenie smeru citlivosti súčiastky na vektor magnetického poľa, vyznačený šípkami a symbolom magnetickej indukcie B . 2) Znáznorenie umiestnenia senzora na DPS nad vodičom, cez ktorý preteká prúd. Prúd vytvára magnetické pole znázornené kruhovými prerušovanými čiarami okolo vodiča.

Navrhnutý senzor sa skladá z magnetorezistívnej súčiastky, operačného zosilňovača, ktorý zosilňuje výstupný signál z magnetorezistívnej súčiastky, a stabilizovaného zdroja, ktorý napája celú sústavu.

4.3.1 Výber napäťového stabilizátora

Vyhodnocovacie a chrániace zariadenie používané v rozvádzači UniGear ZS1 – ochranné zariadenie ABB Relion, obsahuje pomocné napäťové výstupy s napätím do 7 V. Z toho dôvodu boli uvažované napäťové stabilizátory do 5 V.

Pomocou citlivosti magnetorezistora udávanej v katalógovom liste boli vypočítané výstupné hodnoty senzora pre napätie 5 V a 3,3 V, ako najpoužívanějšíe hodnoty v požadovanom napäťovom rozsahu. Maximálny rozdiel výstupného napätia bol vypočítaný pomocou rovnice (4.2) a (4.3)

$$U_{out} = U_{out+} - U_{out-} , \quad (4.2)$$

$$U_{out} = citlivost' \cdot U_{in} \cdot B_{sat} \cdot 10^4, \quad (4.3)$$

kde *citlivost'* je hodnota získaná z katalógového listu súčiastky, U_{in} je vstupné napájacie napätie súčiastky, a B_{sat} je hodnota magnetickej indukcie pri ktorej sa súčiastka dostane do stavu saturácie, taktiež získaná z katalógového listu. Hodnota 10^4 bola pridaná z dôvodu prepočtu magnetickej indukcie z jednotiek 0,1 mT na T. Pre dve vybrané súčiastky a dve napájacie napätia je výstupné napätie súčiastok zobrazené v tab. 5.

Tab. 5: Maximálne výstupné napätie magnetorezistívnej súčiastky pri vstupnom napätí 3,3 V respektíve 5 V.

Senzor	Citlivost' (mV/V) pri zmene o 0,1 mT		B_{sat} (mT)	U_{out} pri $U_{in} = 3,3$ V (V)	U_{out} pri $U_{in} = 5$ V (V)
AA003-02E	Min.	2,00	2	0,132	0,200
	Typ.	2,60	2	0,172	0,260
	Max.	3,20	2	0,211	0,320
AA005-02E	Min.	0,45	10	0,149	0,225
	Typ.	0,55	10	0,182	0,275
	Max.	0,65	10	0,215	0,325

Tieto hodnoty sú dôležité predovšetkým pre operačný zosilňovač a nastavenie jeho zosilnenia tak, aby sa signál pohyboval v jeho pracovnej oblasti.

Nakoľko je ale pre stabilizátory s výstupným napätím 5 V potrebné napájacie napätie aspoň 7 V, bol z dôvodu väčšej rezervy vybraný stabilizátor s hodnotou výstupného napätia 3,3 V. Tento typ stabilizátora zväčša vyžaduje vstupné napätie od 5,3 V.

Z dôvodu dostupnosti bol vybraný stabilizátor firmy Texas Instruments s označením uA78M33. Stabilizátor je možné napájať 5,3 až 25 V. Maximálny výstupný prúd činí 500 mA. Súčiastka bola vybraná v puzdre SOT-223. Na základe katalógového listu boli medzi vstup a zem a výstup a zem umiestnené blokované kondenzátory 330 nF respektíve 100 nF. [28]

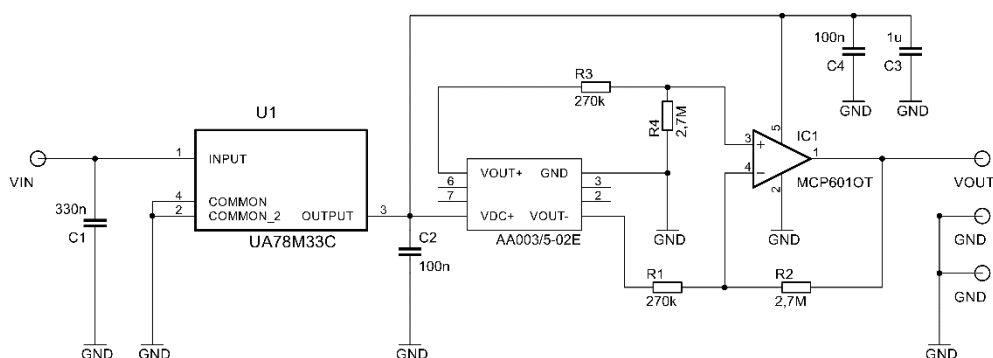
4.3.2 Výber operačného zosilňovača

Maximálne možné teoretické zosilnenie výstupného signálu z magnetorezistívnej súčiastky je pri prepočítaní na napájacie napätie 3,3 V z napájacieho zdroja, ktorý napája aj operačný zosilňovač, 15 násobné. Nakoľko žiaden zosilňovač nezosilňuje v celej škále svojho vstupného napätia, bolo zvolené zosilnenie s rezervou – 10 násobné.

Z dôvodu dostupnosti bol vybraný operačný zosilňovač firmy Microchip s označením MCP601/1R/2/3/4. Tento zosilňovač je typu rail-to-rail, s napájacím napätím 2,7 – 6 V a šírkou pásma 2,8 MHz. Pre parametre výroby senzora je tento typ operačného zosilňovača dostačujúci. [29]

4.3.3 Návrh obvodu

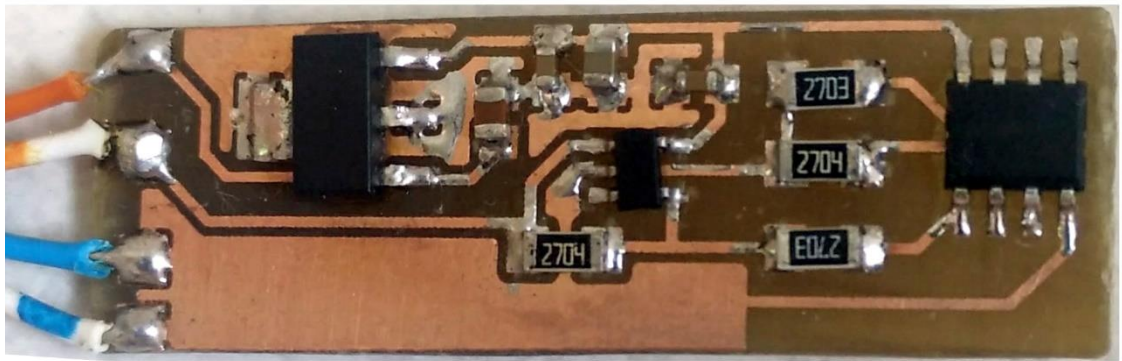
Obvod pre prúdový senzor sa skladá z magnetorezistívnej súčiastky, operačného zosilňovača so zápornou spätnou väzbou a nastaveným 10 násobným zosilnením, a stabilizovaného napät'ového zdroja s výstupom 3,3 V, pre napájanie operačného zosilňovača a magnetorezistívnej súčiastky. Elektrickú schému zapojenia je možné vidieť na obr. 41.



Obr. 41: Elektrická schéma obvodu prúdového senzora.

Na základe odporúčania katalógového listu boli do obvodu medzi výstupy magnetorezistívnej súčiastky a vstupy operačného zosilňovača vložené rezistory s hodnotou 270 kΩ. Toto opatrenie zabraňuje spätnému nabíjaniu magnetorezistora cez spätnú väzbu zosilňovača.

Použité boli rezistory SMD rezistory s veľkosťou puzdra 1206, kondenzátory boli použité taktiež SMD s veľkosťou puzdra 0805. Výsledná podoba senzora je viditeľná na obr. 42. Ostatné dokumenty ohľadom DPS, ako leptacia šablóna, osadenie súčiastok či šablóna pre naniesenie spájkovacej pasty zobrazuje príloha 1.



Obr. 42: DPS senzora s osadenými súčiastkami.

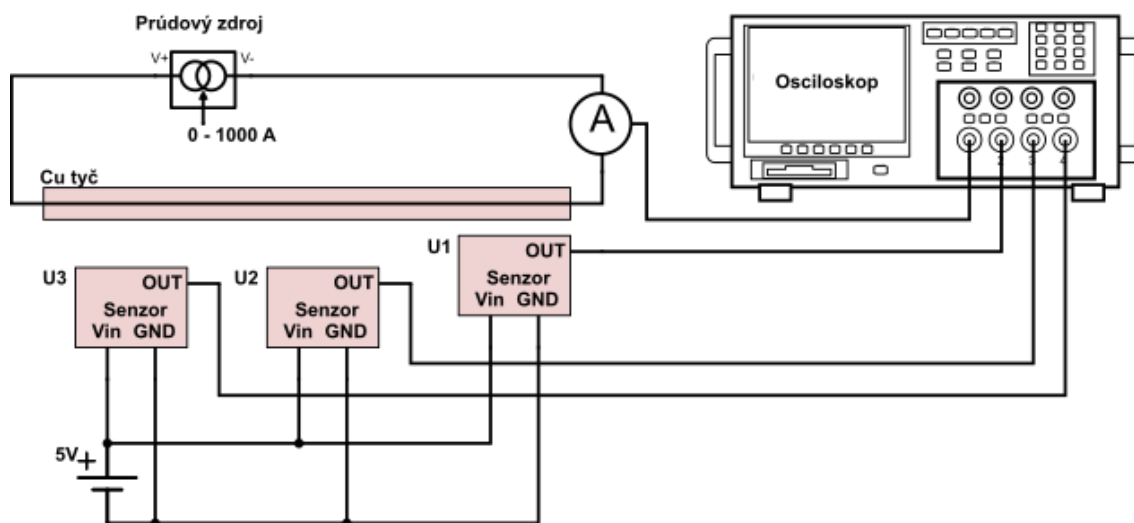
4.4 Meranie vlastností prúdového senzora

Cieľom merania bolo otestovať vlastnosti navrhnutých a vytvorených prúdových senzorov. Meranie malo za cieľ špecifikovať a objasniť predovšetkým tieto body:

- Overenie linearity senzora.
- Správanie senzora pri nižšom magnetickom poli, ktoré je udávané ako lineárny rozsah v katalógovom liste.
- Správanie senzora pri vyššom magnetickom poli, ktoré je udávané ako lineárny rozsah v katalógovom liste.

S ohľadom na tieto ciele boli vopred nastavené hodnoty primárneho meraného prúdu pri ktorých sa bude senzor merať, pričom rozsah testovania bol 0 – 1000 A pri 50 a 60 Hz. Jednotlivé hodnoty prúdu boli vypočítané na základe veľkosti magnetickej indukcie ktorá mala byť vo vzdialenosti umiestnenia senzora.

Testované boli 3 prúdové senzory naraz, pričom bol meraný senzor so súčiastkou AA005 s rozsahom 1 – 7 mT a senzor so súčiastkou AA003 s rozsahom 0,2 – 1,4 mT pri vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča, a senzor so súčiastkou AA005 pri vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča. Zjednodušenú schému zapojenia meracej sústavy je možné vidieť na obr. 43.



Obr. 43: Zjednodušená schéma zapojenia meracej sústavy.

4.4.1 Meracie prístroje

Meranie prebiehalo v laboratóriách firmy ABB v Brne. Pre meranie boli použité nasledovné prístroje.

- **Osciloskop** - použitý typ osciloskopu bol Teledyne LeCroy HDO4034-MS. Tento osciloskop umožňuje zobrazovať signál na štyroch kanáloch a obsahuje 12 bitový prevodník.
- **Prúdová sonda** – použitá bola prúdová sonda dodávaná výrobcom osciloskopu, Teledyne LeCroy CP500. Prúdová sonda je určená na meranie prúdu do 500 A_{rms} a 700 A špičkového prúdu.
- **Napájací zdroj malého napätia** – ako napájací zdroj bol použitý zdroj OWON ODP3032. Použitý bol výstup 5 V / 3 A.
- **Regulovateľný zdroj prúdu** – vybavenie laboratória ABB, skladajúci sa z regulovateľného prúdového transformátora. Pre účely merania regulovaný v rozsahu 0 až 1000 A.

4.4.2 Priebeh merania

Meranie magnetického poľa prebiehalo v okolí vodiča, cez ktorý pretekal primárny prúd. Vodič tvorila približne 1,5 metra dlhá medená tyč s priemerom 50 mm. Tyč bola pripojená silovými káblami ku prúdovému zdroju. Zapojenie a ovládanie primárneho vysokoprúdového obvodu bolo prevádzkané z bezpečnostných dôvodov pracovníkmi ABB.

Nad tyč sa upevnili tri prúdové senzory tak, aby vzdialenosť dvoch bola 5 cm od stredu vodiča, a vzdialenosť tretieho 3 cm od stredu vodiča. Sensory boli umiestnené tak, aby sa stred magnetorezistívnej súčiastky nachádzal nad stredom vodiča. Sensory boli

pripojené na napájací zdroj malého napätia a výstupy pripojené na osciloskop. K osciloskopu bola pripojená taktiež prúdová sonda merajúca aktuálny prúd pretekajúci obvodom.

Prúdová sonda bola umiestnená na výstup normálového transformátora s prevodom $5000 / 5 \text{ A}$.

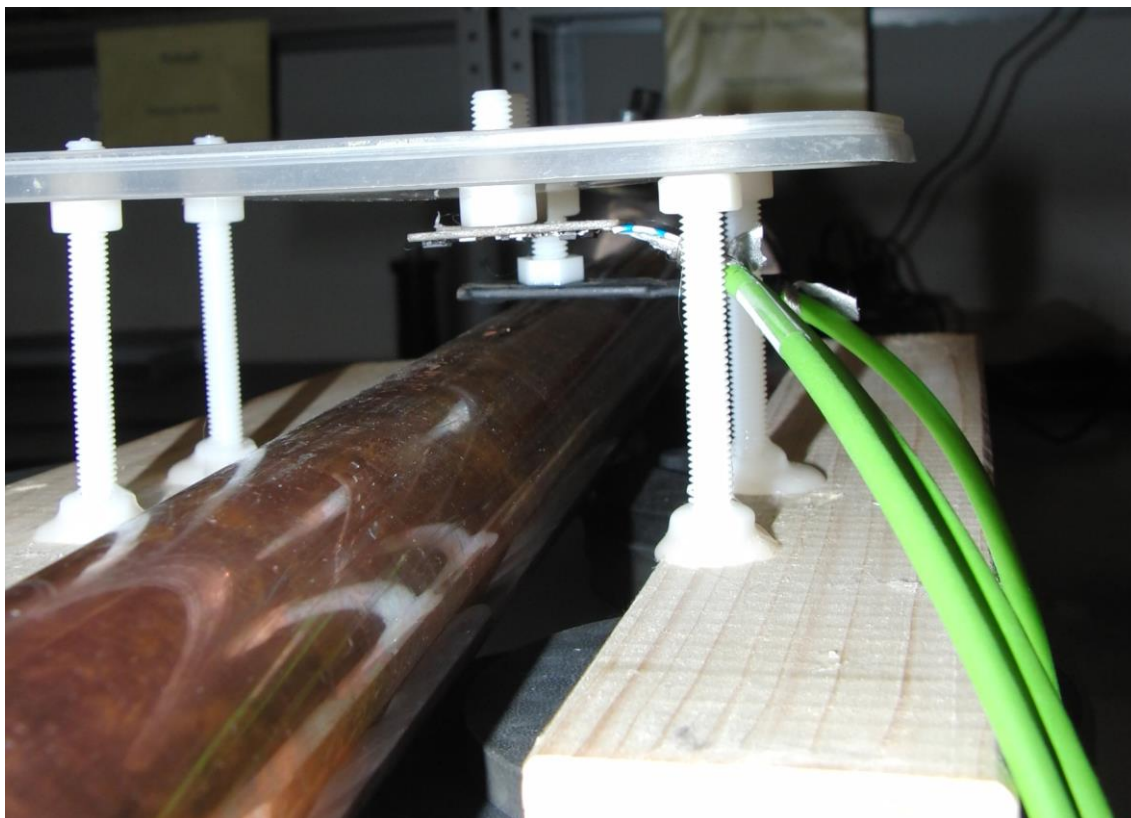
Na osciloskope boli zobrazené 4 signály, jeden z prúdovej sondy a tri z testovaných prúdových senzorov. Osciloskop bol nastavený na zobrazovanie signálu v režime DC coupling. Odčítaná bola efektívna hodnota zobrazovaného signálu ako z prúdovej sondy, tak aj z meraných senzorov.

Zmeraná bola sekvencia vopred pripravených hodnôt prúdov, ako uvádza príloha 2, v prvom prípade s frekvenciou 50 Hz a v druhom prípade 60 Hz. Zdrojom energie prúdového transformátora pri meraní 50 Hz frekvencie bola klasická rozvodná sieť, pri meraní 60 Hz musela byť energia do transformátora dodávaná cez zdroj s nastaviteľnou frekvenciou.

Fotografia z priebehu merania je zobrazená na obr. 44 a obr. 45.



Obr. 44: Zobrazenie meracieho zázemia. Na obrázku je možné vidieť medenú tyč nad ktorou sa nachádzajú senzory, prúdový transformátor (napravo) a normálový transformátor (naľavo).



Obr. 45: Detail uchytenia senzorov nad medenou tyčou.

4.5 Vyhodnotenie merania

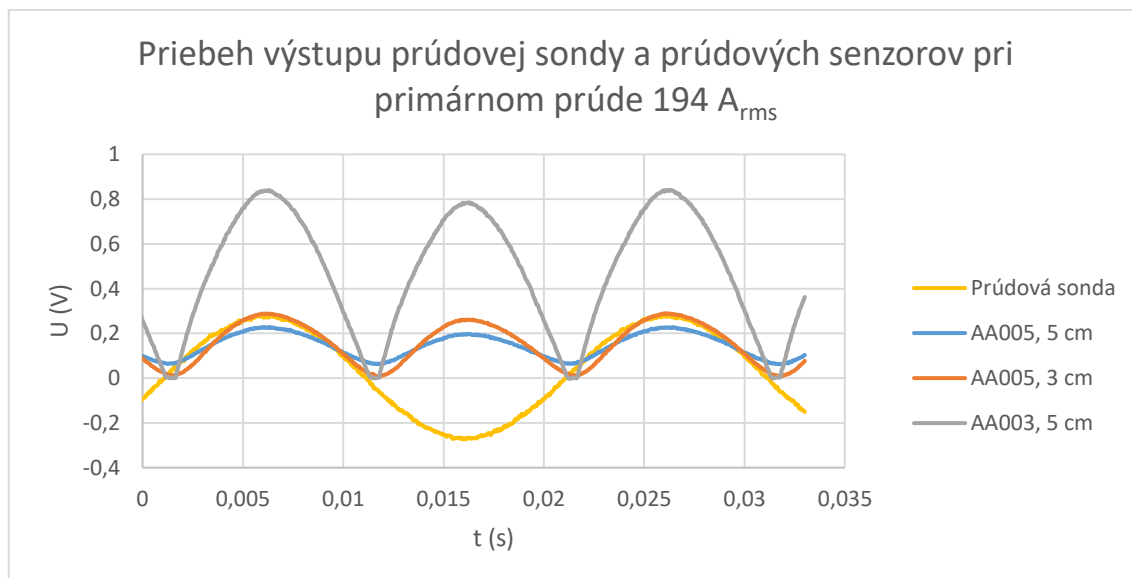
Magnetorezistívny senzor je citlivý na absolútnu hodnotu magnetického poľa, pričom nedokáže rozlíšiť, z ktorej strany na senzor pôsobí vektor magnetickej indukcie. Pri striedavom prúde sa generuje premenlivé magnetické pole, ktoré mení veľkosť magnetického poľa a otáča vektor magnetickej indukcie v priamej úmere s aktuálnou veľkosťou prúdu v čase.

Nakoľko senzor zobrazuje absolútnu hodnotu magnetického poľa a nie jeho smer, výsledný signál senzora pripomína dvojcestne usmernený harmonický signál, ak je zdrojom primárneho prúdu bežná rozvodová energetická sústava.

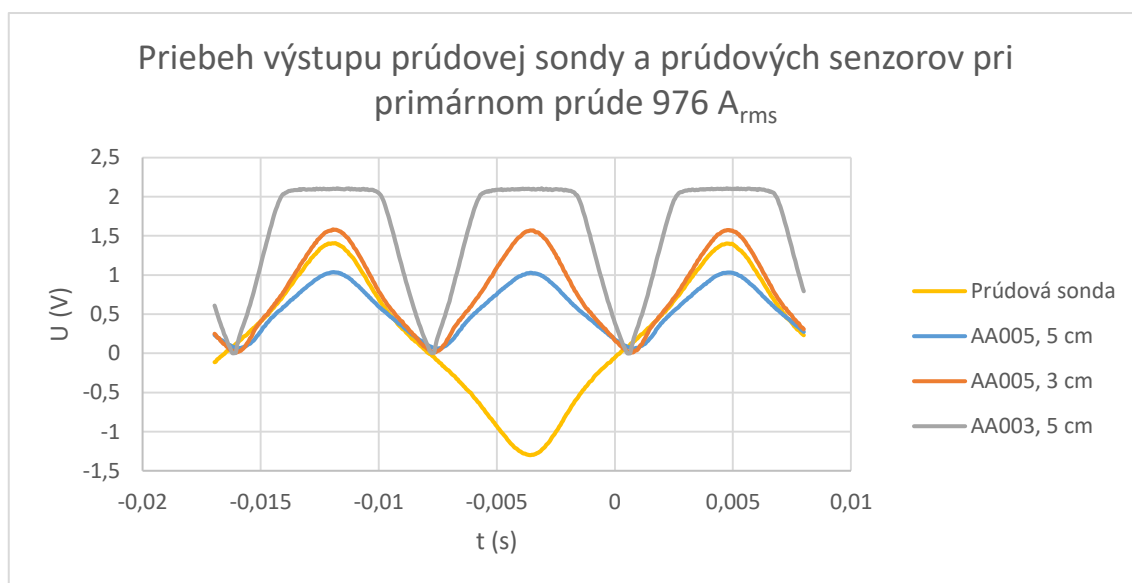
4.5.1 Vyhodnotenie merania pre frekvenciu 50 Hz

Priebeh signálu pre prúdovú sondu a výstupy prúdových senzorov, pri primárnom prúde pretekajúcom vodičom 194 A_{rms}, je možné vidieť na obr. 46.

Na obr. 47 je možné vidieť rovnaké priebehy pre prúd 976 A_{rms}. Na tomto obrázku je taktiež viditeľné, že prúdový senzor so súčiastkou AA003 sa dostal do saturácie.

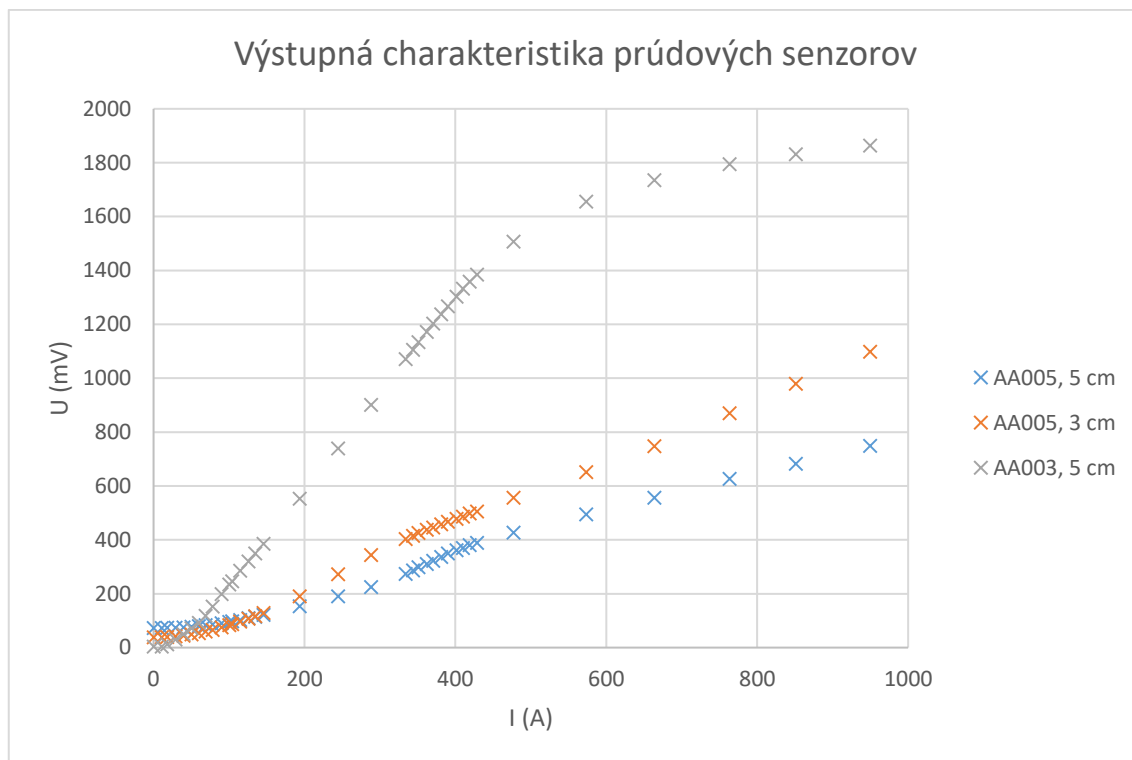


Obr. 46: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde 194 A_{rms}.



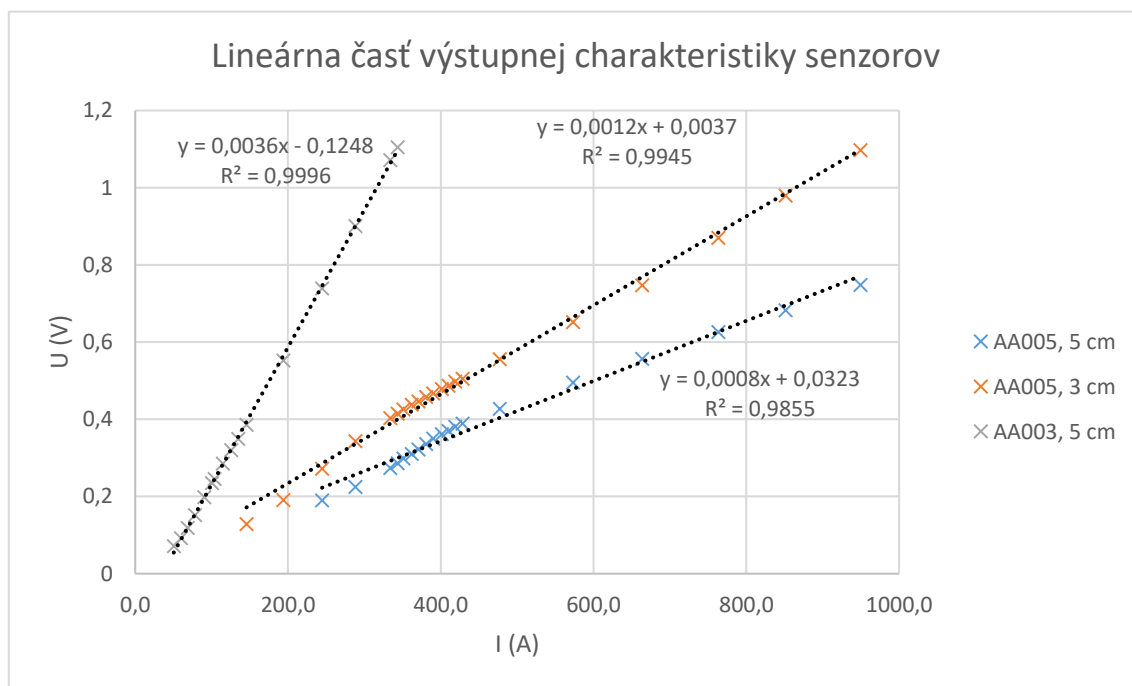
Obr. 47: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde 976 A_{rms}.

Na obr. 48 je znázornený priebeh merania jednotlivých hodnôt prúdu. Odčítané boli efektívne hodnoty výstupu prúdových senzorov. Z grafu je jasne viditeľná lineárna charakteristika v predpokladanom lineárnom rozsahu súčiastky. Zároveň je viditeľný nelineárny nástup, teda hodnoty pri menšej veľkosti magnetického poľa aké boli deklarované rozsahom súčiastky. V prípade senzoru so súčiastkou AA003 je viditeľný aj prechod do nelineárnej časti charakteristiky až saturácie vplyvom väčšej veľkosti magnetického poľa, ako bola deklarovaná výrobcom. Grafy priebehov jednotlivých senzorov zobrazuje príloha 2.



Obr. 48: Výstupná charakteristika prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.

Na obr. 49 sú znázornené lineárne charakteristiky troch meraných senzorov. Z týchto charakteristík boli pomocou regresných priamok vytvorené funkcie na prepočet výstupného napätia senzora na prúd. Tieto funkcie sú zobrazené rovnicami (4.4) až (4.6).



Obr. 49: Lineárna časť výstupnej charakteristiky prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.

Pre senzor so súčiastkou AA005 umiestnený vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U - 0,0323}{0,0008}. \quad (4.4)$$

Pre senzor so súčiastkou AA005 umiestnený vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U - 0,0037}{0,0012}. \quad (4.5)$$

Pre senzor so súčiastkou AA003 umiestnený vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U + 0,1248}{0,0036}. \quad (4.6)$$

Na základe týchto rovníc boli namerané hodnoty výstupného napätia prepočítané na prúd a študovaná relatívna chyba medzi vypočítaným prúdom a prúdom referenčným, nameraným prúdovou sondou. Táto chyba sa počítala pomocou vzťahu (4.7) a je udávaná v percentách.

$$\Delta_r = \frac{I_{\text{vypočítané}} + I_{\text{referenčné}}}{I_{\text{referenčné}}} \cdot 100. \quad (4.7)$$

Nelinearita, alebo chyba linearity merania, bola počítaná ako maximálny absolútny rozdiel meranej a referenčnej hodnoty, v percentách hornej hranice meraného rozsahu. Definovaná je vzťahom (4.8)

$$L_e = \frac{\Delta I_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} \cdot 100. \quad (4.8)$$

Pre senzor so súčiastkou AA005 vzdialenou 5 cm od stredu vodiča môžeme pozorovať väčšiu relatívnu chybu v oblasti začiatku lineárnej oblasti, teda od hodnoty 244 A. Od tejto hodnoty by mal mať na základe výpočtu veľkosti magnetickej indukcie senzor lineárny priebeh, pretože pri tejto hodnote prúdu je generované magnetické pole o veľkosti 1 mT vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča. Od hodnoty 343 A dosahuje relatívna chyba maximálnych hodnôt 6%. Chyba linearity je v tomto prípade 5,8%. Nelinearita udávaná v katalógovom liste, 2%, bola prekročená. Avšak v katalógovom liste nie je špecifikovaný spôsob výpočtu nelinearity. Jednotlivé hodnoty relatívnej chyby je možné vidieť v tab. 6.

Tab. 6: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
189,7	244,6	196,8	-19,5%
224,1	288,2	239,7	-16,8%
273,4	333,9	301,4	-9,7%
285,6	343,6	316,7	-7,8%
298,6	351,0	332,9	-5,2%
309,8	361,9	346,9	-4,1%
321,3	370,6	361,3	-2,5%
335,8	381,0	379,4	-0,4%
349,3	390,2	396,3	1,6%
360,9	401,4	410,8	2,3%
369,8	410,0	421,9	2,9%
380,2	419,1	434,9	3,8%
388,6	428,5	445,3	3,9%
426,7	477,1	493,0	3,3%
494,6	573,2	577,9	0,8%
556,2	663,6	654,8	-1,3%
626,2	763,3	742,4	-2,7%
682,2	851,3	812,4	-4,6%
747,9	949,5	894,5	-5,8%

V prípade druhého prúdového senzoru so súčiastkou AA005 umiestneným 3 cm od stredu vodiča sa režimu linearity podľa výpočtov dosiahlo pri hodnote 193 A. Nelinearita v tomto prípade dosiahla hodnotu 4,7%. Jednotlivé hodnoty sú zobrazené v tab. 7.

Tab. 7: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
190,1	193,8	155,3	-19,8%
271,8	244,6	223,4	-8,7%
342,8	288,2	282,6	-2,0%
402,3	333,9	332,2	-0,5%
414,1	343,6	342,0	-0,5%
425,4	351,0	351,4	0,1%
437,4	361,9	361,4	-0,1%
445,7	370,6	368,3	-0,6%
457,7	381,0	378,3	-0,7%

466,9	390,2	386,0	-1,1%
478,0	401,4	395,3	-1,5%
486,2	410,0	402,1	-1,9%
497,5	419,1	411,5	-1,8%
504,8	428,5	417,6	-2,5%
555,4	477,1	459,8	-3,6%
651,2	573,2	539,6	-5,9%
746,9	663,6	619,3	-6,7%
869,3	763,3	721,3	-5,5%
978,9	851,3	812,7	-4,5%
1097,3	949,5	911,3	-4,0%

V prípade prúdového senzora so súčiastkou AA003 vo vzdialenosti 5 cm od vodiča bola v priebehu merania obsiahnutá celá oblasť linearity súčiastky. Lineárna oblasť bola podľa prepočtov v rozsahu 50 – 343 A primárneho prúdu. Nelinearita v tomto prípade dosahovala výrazne lepšie výsledky a dosiahla hodnotu 1,3 %, čím bola dosiahnutá hodnota uvedená v katalógovom liste. Jednotlivé hodnoty je možné nájsť v tab. 8. Výstupné hodnoty senzora pokračovali v lineárnom priebehu až do hodnoty 428 A, a to v rámci 2% relatívnej chyby.

Tab. 8: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA003, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
70,7	50,4	54,3	7,7%
91,5	60,0	60,1	0,1%
117,9	68,8	67,4	-2,0%
151,7	78,2	76,8	-1,8%
198,0	90,3	89,7	-0,7%
234,0	100,5	99,7	-0,8%
245,4	104,0	102,8	-1,1%
285,1	114,6	113,9	-0,6%
319,8	125,6	123,5	-1,7%
348,9	134,7	131,6	-2,3%
385,3	145,7	141,7	-2,7%
552,4	193,8	188,1	-2,9%
738,6	244,6	239,8	-1,9%
900,7	288,2	284,9	-1,2%
1070,9	333,9	332,1	-0,5%
1104,7	343,6	341,5	-0,6%

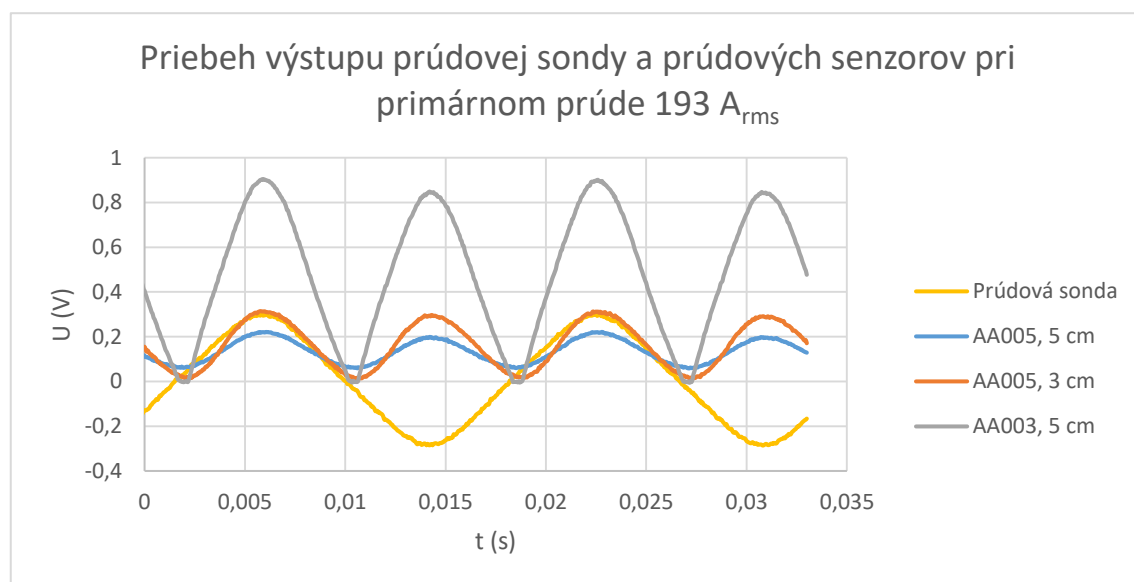
4.5.2 Vyhodnotenie merania pre frekvenciu 60 Hz

Pri vyhodnocovaní 60 Hz priebehov je potrebné zmieniť, že táto frekvencia bola vytvorená cez frekvenčný menič. To sa podpísalo na tvaroch charakteristík, kedy pri vyšších prúdoch mal primárny prúd charakteristiku skôr trojuholníkového signálu, ako sínusu.

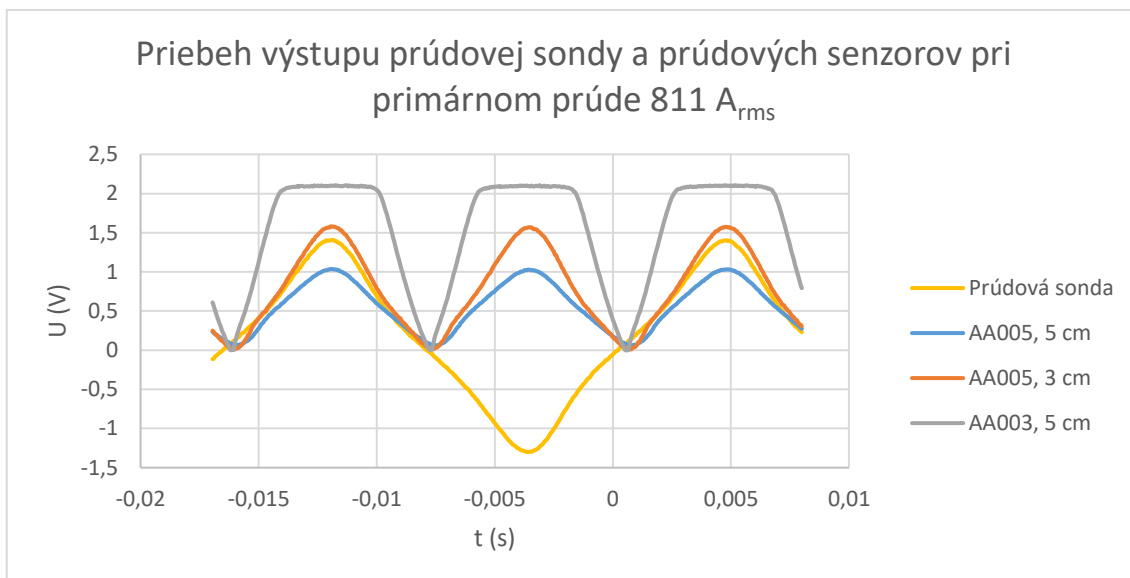
Priebeh signálu pre prúdovú sondu a výstupy prúdových senzorov, pri primárnom prúde pretekajúcom vodičom $193\text{ A}_{\text{rms}}$, je možné vidieť na obr. 50.

Na obr. 51 je možné vidieť rovnaké priebehy pre prúd $811\text{ A}_{\text{rms}}$. Na tomto obrázku je taktiež viditeľné, že prúdový senzor so súčiastkou AA003 sa dostal do saturácie.

Pri meraní na frekvencii 60 Hz bol prúd $811\text{ A}_{\text{rms}}$ maximálny dosiahnutý prúd, z dôvodu limitov frekvenčného meniča.

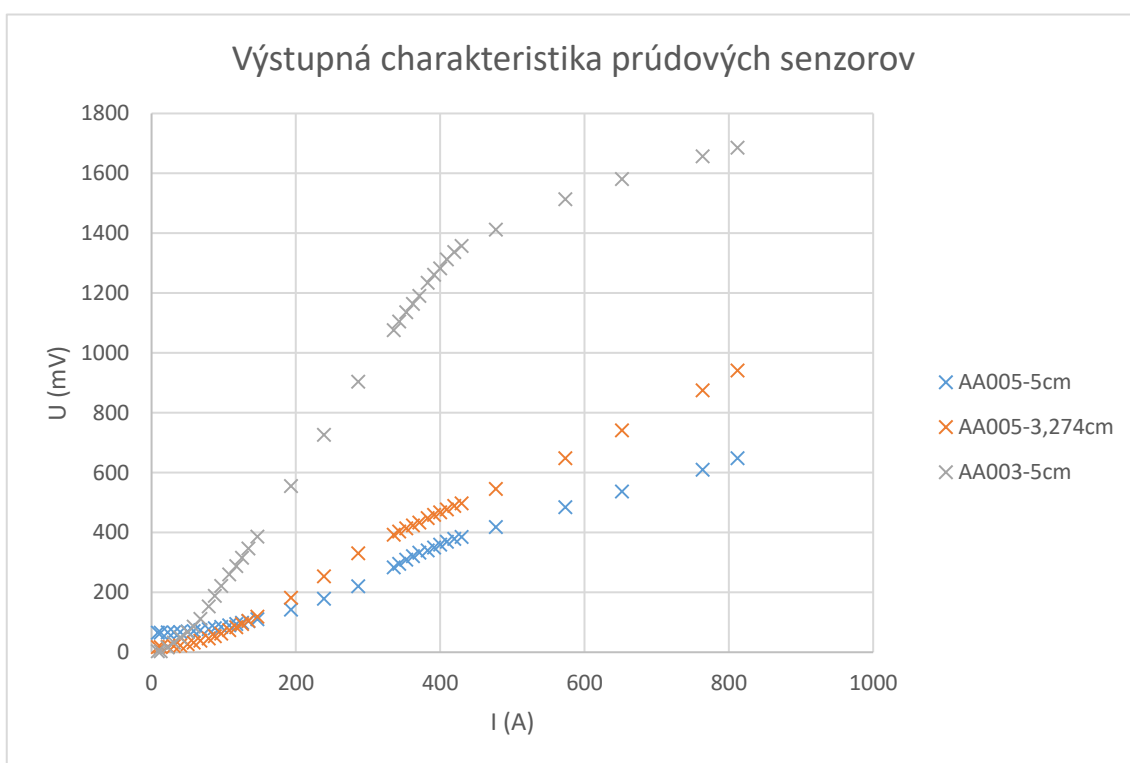


Obr. 50: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde $193\text{ A}_{\text{rms}}$.



Obr. 51: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde 811 A_{rms}.

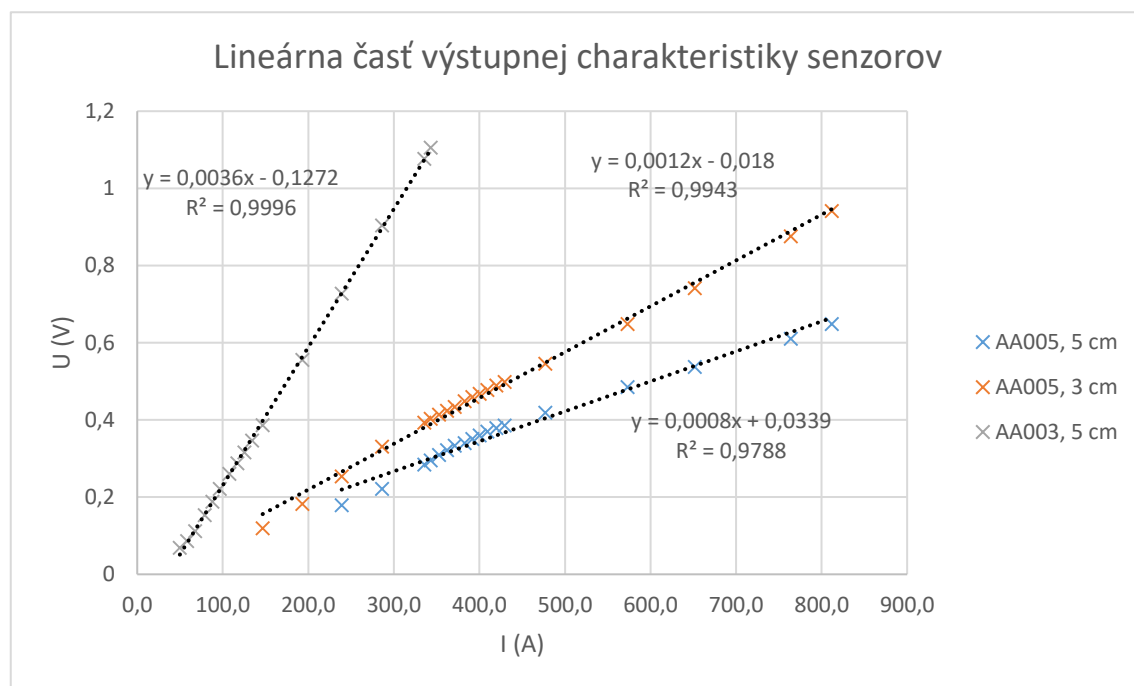
Podobne, ako pri vyhodnotení merania o frekvencii 50 Hz, môžeme na obr. 52 vidieť výstupné charakteristiky prúdových senzorov v celej škále meraných prúdov. Tvary priebehov korešpondujú s priebehmi pre 50 Hz.



Obr. 52: Výstupná charakteristika prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.

Z lineárnej časti priebehu boli taktiež vytvorené funkcie na prepočet výstupného

napätia senzora na prúd. Tieto funkcie sú zobrazené rovnicami (4.9) až (4.11). Lineárne časti priebehov s regresnými priamkami sú zobrazené na obr. 53.



Obr. 53: Lineárna časť výstupnej charakteristiky prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.

Pre senzor so súčiastkou AA005 umiestnený vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U - 0,0339}{0,0008}. \quad (4.9)$$

Pre senzor so súčiastkou AA005 umiestnený vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U + 0,0018}{0,0012}. \quad (4.10)$$

Pre senzor so súčiastkou AA003 umiestnený vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča platí

$$I = \frac{U + 0,1272}{0,0036}. \quad (4.11)$$

Jednotlivé hranice linearity súčiastok boli v prípade 60 Hz signálu veľmi podobné ako pri meraní 50 Hz signálu. V tab. 9 až tab. 11 sú zobrazené lineárne priebehy jednotlivých meraných senzorov pre meranie 60 Hz signálu. Relatívne chyby približne korešpondujú s meraniami 50 Hz signálu. Chyba linearity dosiahla pre senzor AA005

vzdialený 5 cm hodnotu 7,1% a to hlavne z dôvodu vysokej relatívnej chyby na začiatku lineárneho rozsahu.

Tab. 9 Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
179,0	239,0	181,4	-24,1%
220,7	286,2	233,5	-18,4%
283,8	335,6	312,4	-6,9%
294,9	342,9	326,3	-4,8%
309,4	352,8	344,4	-2,4%
321,2	362,2	359,1	-0,8%
333,2	371,1	374,1	0,8%
340,0	382,6	382,7	0,0%
350,3	391,6	395,5	1,0%
360,0	400,1	407,6	1,9%
369,2	409,3	419,2	2,4%
378,7	419,6	431,0	2,7%
385,7	429,4	439,7	2,4%
418,5	477,1	480,8	0,8%
484,8	573,2	563,6	-1,7%
537,0	651,9	628,9	-3,5%
610,1	763,8	720,3	-5,7%
648,0	811,8	767,6	-5,4%

Pre súčiastku AA005 umiestnenú vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča dosiahla hodnota nelinearity 5,3%. Opäť z dôvodu veľmi výraznej relatívnej chyby na začiatku lineárneho rozsahu súčiastky.

Tab. 10: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
182,3	193,1	150,4	-22,1%
253,3	239,0	209,6	-12,3%
330,9	286,2	274,3	-4,2%
392,9	335,6	325,9	-2,9%
403,0	342,9	334,3	-2,5%
413,9	352,8	343,4	-2,7%
423,7	362,2	351,6	-2,9%
433,8	371,1	360,0	-3,0%

448,3	382,6	372,1	-2,7%
458,8	391,6	380,8	-2,7%
467,2	400,1	387,8	-3,1%
477,4	409,3	396,3	-3,2%
489,4	419,6	406,3	-3,2%
498,0	429,4	413,5	-3,7%
545,3	477,1	452,9	-5,1%
648,0	573,2	538,5	-6,1%
741,2	651,9	616,2	-5,5%
875,6	763,8	728,2	-4,7%
941,0	811,8	782,7	-3,6%

V prípade súčiastky AA003 bola podobne ako pri 50 Hz meraní dosiahnutá linearita veľmi dobrá, chyba linearity činila 1,3%. Z uvedeného môžeme konštatovať, že súčiastka AA003 dosahuje vyššiu presnosť a linearitu ako súčiastky AA005.

Tab. 11: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA003, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.

U_{out} (mV)	I_{merané} (A)	I_{vypočítané} (A)	Relatívna chyba
68,06	49,8	53,6	7,6%
86,28	58,1	58,6	0,9%
111,65	67,5	65,7	-2,7%
153,16	79,0	77,2	-2,3%
188,18	87,8	86,9	-1,0%
221,17	96,3	96,1	-0,2%
259,91	107,6	106,9	-0,7%
287,73	117,2	114,6	-2,2%
315,78	125,4	122,4	-2,4%
346,44	134,1	130,9	-2,4%
386,39	146,6	142,0	-3,1%
555,5	193,1	189,0	-2,1%
726,9	239,0	236,6	-1,0%
903,9	286,2	285,8	-0,2%
1076,1	335,6	333,6	-0,6%
1105,1	342,9	341,6	-0,4%

Výsledky merania pre signál o frekvencii 50 Hz aj 60 Hz sú veľmi podobné. Smernica výslednej charakteristiky sa líši medzi jednotlivými meraniami len minimálne, v najhoršom prípade o 3%. Táto odchýlka môže byť spôsobená aj samotným 60 Hz signálom, ktorého tvar viac pripomínal viac trojuholníkový signál ako sínus.

Rozdielnou hodnotou je v tomto prípade posun priamky výslednej charakteristiky, ktorý je pre jednotlivé merania rozdielny. Predpoklad je, že za samotný posun priamky je zodpovedný DC offset na výstupe operačného zosilňovača. Je tiež faktom, že po prvom meraní sa výstupné napätie pri vypnutom primárnom obvode zmenšilo, a to u súčiastok AA005. Súčiastka AA003 mala výstupné napätie rovnaké v oboch meraniach.

Problém zmeny offsetu je pravdepodobne zapríčinený spätným nabíjaním MR súčiastky cez spätnú väzbu operačného zosilňovača. Tento problém sa dá odstrániť sofistikovanejším zosilňovacím obvodom s použitím viacerých operačných zosilňovačov tak, aby výstupy MR súčiastky boli priamo zapojené na vstupy operačného zosilňovača. Zároveň sa dá vplyv offsetu minimalizovať meraním v režime AC coupling.

4.5.3 Prenosové charakteristiky senzorov

Prenosová charakteristika senzorov vypočítaná z nameraných priebehov je v tomto prípade len orientačná. Nakoľko správna hodnota je veľmi náchylná na umiestnenie senzora, či už do stredovej osi vodiča alebo do určitej vzdialenosti. Rovnako je náchylná aj na dĺžku vodiča primárneho prúdu. Pre výpočet presných prenosových charakteristík by bolo potrebné množstvo meraní s veľmi presne umiestneným senzorom a možnosťou jeho presného posuvu do rôznych vzdialeností od stredu vodiča, ako aj do strán. Pre účely tejto práce je však postačujúce toto meranie a následné matematicko-fyzikálne dopočítanie prenosových charakteristík.

Jedným z dôležitých faktorov ovplyvňujúcich výsledok merania je citlivosť samotnej magnetorezistívnej súčiastky. V prípade súčiastky AA005 je rozsah citlivosti na veľkosť magnetického poľa 36%, pri súčiastke AA003 až 46%. Z toho dôvodu by musel byť senzor pred distribúciou presne skalibrovaný a opatrený korekčným faktorom, aby poskytoval presné výsledky merania.

Výpočet citlivosti MR súčiastky je možné získať pomocou smernice priamky ktorou aproximujeme lineárny priebeh nameraných dát. S využitím rovníc (4.3) a (1.5) vieme zostaviť rovnicu (4.12), ktorá nám udá veľkosť citlivosti

$$citlivost' = \frac{smernica}{U_{in} \cdot \frac{\mu_0}{4\pi R} \left(\frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2}} \right) \cdot 10^4} \quad (4.12)$$

Pre tento výpočet je potrebné presne poznať vzdialenosti umiestnenia senzoru od stredu vodiča, ako aj vzdialenosti jeho umiestnenia vzhľadom na dĺžku vodiča.

Ak je známa hodnota veľkosti magnetickej indukcie, môžeme citlivosť vypočítať jednoduchšie priamo pomocou rovnice (4.13)

$$citlivost' = \frac{U_{out}}{U_{in} \cdot B \cdot 10^4 \cdot A} \quad (4.13)$$

kde A je zosilnenie výstupného signálu zo senzoru.

Pomocou týchto rovnice (4.12) bola vypočítaná citlivosť jednotlivých senzorov, zobrazená v tab. 12.

Tab. 12: Vypočítaná citlivosť MR súčiastok.

	R (mm)	L₁ (m)	L₂ (m)	Citlivosť (mV/V)
AA003-02E	48,73	0,75	0,75	2,638
AA005-02E	48,73	0,75	0,75	0,576
AA005-02E	32,74	0,75	0,75	0,564

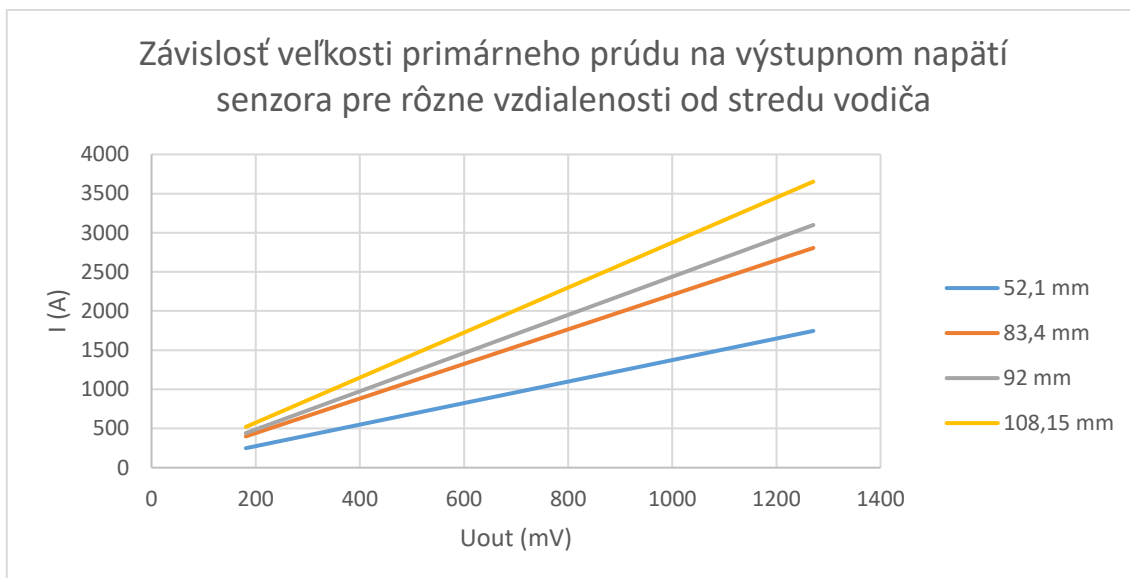
Pomocou tohto údaju je možné zostaviť rovnicu prenosovej charakteristiky pre ľubovoľné vzdialenosti.

Výsledná prevodná charakteristika (4.14) pre súčiastku AA005 použitú pri meraní vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča má tvar

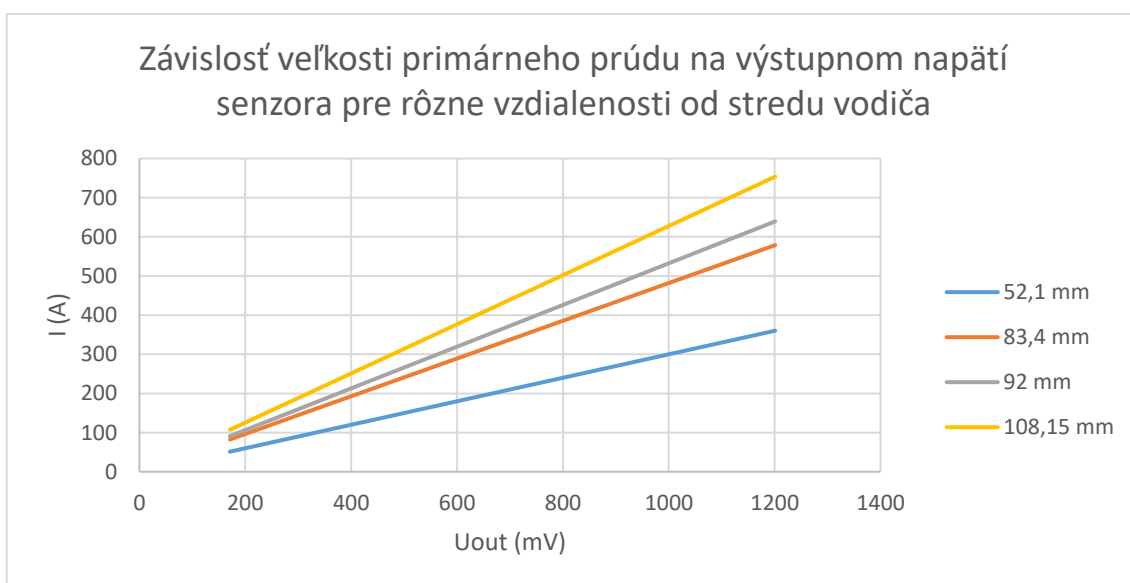
$$I = \frac{U_{out}}{U_{in} \cdot \frac{\mu_0}{4\pi R} \left(\frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2}} \right) \cdot 10^4} \quad (4.14)$$

Obr. 54 a obr. 55 znázorňujú ideálne priebehy pre vzdialenosti senzoru od stredu vodiča, v ktorých sa v ABB vyrábajú aktuálne používané prúdové senzory, ako je znázornené v tab. 3. Na tomto obrázku sú jednotlivé krivky zobrazené v lineárnej časti priebehu.

Ostatné priebehy zobrazuje príloha 2.



Obr. 54: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora A005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.



Obr. 55: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora A003 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.

4.6 Senzor pre UniGear ZS1

Súčiastky AA005 a AA003 boli vyberané zámerne tak, aby sa im vzájomne prekrývali lineárne rozsahy. Kombináciou týchto senzorov môžeme zmerať väčší rozsah, čo je

rozhodne žiadúca funkcia.

V kombinácii senzorov AA003 a AA005 sa tak rozšíri lineárny rozsah na hodnoty zobrazené v tab. 13. Pre senzor s polomerom 83,4 mm, ktorý sa v rozvádzači ZS1 používa pre meranie prúdov až do 4000A by MR súčiastky neposkytovali dostatočný rozsah. V tomto prípade by bolo nutné navrhnuť tvar senzoru tak, aby bola súčiastka snímajúca veľkosť magnetického poľa umiestnená do väčšej vzdialenosti od stredu vodiča. Ostatné veľkosti senzorov vyhovujú rozsahu MR súčiastok, mohli by si tak teda zachovať svoj tvar a tým pádom minimalizovať potrebné úpravy v samotnom rozvádzači. Tvar senzora so vzdialenosťou snímacej časti k stredu vodiča 52,1 mm alebo 83,4 mm je možné vidieť na obr. 56.



Obr. 56: prúdový senzor ABB KECA 80, ktorého tvar je možné využiť aj pre magnetorezistívny senzor.

Tab. 13: Hodnoty rozsahu kombinácie senzorov pre zaužívané vzdialenosti umiestnenia od stredu vodiča.

Senzor	Vzdialenosť k stredu vodiča (mm)	Min. prúd (A)	Max. prúd (A)	Požadovaný nom. prúd (A)
AA003 + AA005	52,10	51	1746	1250
AA003 + AA005	83,40	82	2806	4000
AA003 + AA005	92,00	91	3099	1250
AA003 + AA005	108,15	107	3653	3150

MR súčiastky môžu byť umiestnené na DPS vedľa seba, prípadne môžu byť súčiastky umiestnené na náprotivných stranách senzora. Vyhodnocovacie a meracie

zariadenie bude mať nakonfigurovanú oblasť, v ktorej bude prepínať medzi vyhodnocovaním jednotlivých MR súčiastok. Nakoľko jednotlivé súčiastky sú podľa výsledkov merania presnejšie až pri vyšších hodnotách magnetického poľa ako je deklarované lineárnym priebehom, a zároveň súčiastka AA003 si zachováva presnosť aj po prekročení veľkosti magnetického poľa ohraničujúceho lineárny priebeh, ponúka sa nastavenie tejto prepínacej oblasti na hodnotu veľkosti magnetickej indukcie 1,4 mT.

4.7 Porovnanie s technológiami využívanými v ABB

V ABB sa pre meranie prúdu pretekajúceho vysokonapäťovým rozvádzačom používajú dve metódy. Prvou sú klasické konvenčné prístrojové transformátory, druhou je prúdový senzor na princípe Rogowského cievky.

Prístrojové transformátory sa vyrábajú s nespočetnou variáciou parametrov, splňajú triedy presnosti od 0.2 a dodávajú sa v rôznych triedach, na základe požiadavky zákazníka. Každopádne, transformátor má množstvo nevýhod, ktoré sú presnejšie popísané v kapitole 3.1.

Prúdový senzor na princípe Rogowského cievky používaný v rozvádzačoch ABB dosahuje triedu presnosti 0.5 v celom rozsahu prúdového spektra až do hodnoty hraničného tepelného prúdu.

Navrhnutý prototyp prúdového senzoru založený na báze MR materiálu tieto parametre zatiaľ nedosahuje. Nie je však vylúčené, že vylepšením či už magnetorezistívnej súčiastky, ako aj nadväzujúceho zosilňovacieho obvodu nie je možné podobné hodnoty dosiahnuť. Nevýhodou ostáva oproti aktuálne používanému typu prúdového senzoru obmedzený rozsah meraného prúdu.

Medzi výhody sa však môže radiť minimálna veľkosť a možnosť umiestnenia prakticky kdekoľvek do blízkosti vodiča prúdu.

Výrobné náklady na MR senzor by pri veľkovýrobe na základe odhadov nemali presahovať hodnotu 10 € za kus.

5 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberala rešeršou nekonvenčných metód merania napätia a prúdu a následným návrhom a vytvorením prototypu prúdového senzora na báze magnetorezistívneho materiálu pre vysokonapäťový rozvádzač ABB UniGear ZS1.

V teoretickej časti, teda časti kde bola prevedená rešerš na nekonvenčné metódy merania, sa rešerš zamerala zvlášť na metódy pre meranie prúdu a zvlášť pre metódy merania napätia, pričom boli popísané jednotlivé metódy, ich fyzikálna podstata ako aj spôsob merania.

Nekonvenčné metódy merania prúdu prezentované v tejto diplomovej práci využívajú magnetické pole generované v okolí vodiča cez ktorý preteká prúd. Toto magnetické pole spôsobuje rôzne interakcie a ovplyvňuje vlastnosti rôznych magnetosenzitívnych materiálov. Na základe týchto zmien sa vykonáva meranie podľa toho, ktorú z vlastností materiálu magnetické pole ovplyvňuje.

V prípade napäťových senzorov ovplyvňuje vlastnosti materiálu elektrické pole. Pri piezoelektrickom senzore napätie spôsobuje deformáciu materiálu, pri optických senzoroch zasa index lomu materiálu.

Na základe vykonanej rešerše bolo pre praktickú časť diplomovej práce rozhodnuté vytvoriť prototyp prúdového senzora na báze magnetorezistívneho materiálu, ktorý by bol použiteľný pre vysokonapäťový rozvádzač UniGear ZS1 od firmy ABB.

Pomocou výpočtov bola stanovená predpokladaná veľkosť magnetickej indukcie v okolí vodiča v rozvádzači UniGear ZS1, a na základe týchto hodnôt boli vybrané magnetorezistívne súčiastky, ktoré poskytovali dostatočný rozsah pre meranie škály tohto magnetického poľa.

Navrhnutý bol jednoduchý prototyp prúdového senzora, ktorý bol následne testovaný v laboratóriách firmy ABB. Testovaný rozsah prúdu bol od 0 do 1000 A. Testovanie preukázalo funkčnosť magnetorezistívneho prúdového senzora a prostredníctvom nameraných hodnôt boli vypočítané prenosové charakteristiky senzorov z výstupného napätia senzora na meraný prúd.

Senzor však vykazoval nie najvhodnejšie hodnoty presnosti a chyby linearity. Senzor osadený súčiastkou AA005, ktorá bola svojim lineárnym rozsahom 1 – 7 mT určená pre snímanie vysokých prúdov, generujúcich väčšie magnetické polia, dosahoval chyby linearity 5,8% a relatívnu chybu 6%.

Senzor osadený súčiastkou AA003, ktorá bola svojim lineárnym rozsahom 0,2 – 1,4 mT určená pre snímanie nižších prúdov, na druhú stranu vykazoval linearitu 1,3% a relatívna chyba nameranej a referenčnej hodnoty bola do 3%.

Tieto hodnoty však majú predpoklad na zlepšenie pri ďalších vylepšeniach obvodu,

napríklad zosilnenie sústavou operačných zosilňovačov tak, aby bol výstup MR súčiastky zapojený priamo na vstup operačného zosilňovača a tým sa zabránilo spätnému nabíjaniu MR súčiastky cez spätnú väzbu zosilňovača.

Námetom ďalšej práce môžu byť práve tieto vylepšenia a vyhotovenie a kalibrovanie konkrétnych typov senzorov, ktoré boli navrhnuté v tejto práci.

Dokázané však bolo, že magnetorezistívna technológia v použití pre meranie vysokých prúdov funguje a môže byť na tento účel do budúcnosti použiteľná.

LITERATÚRA

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] OUYANG, Yong, Jinliang HE, Jun HU a Shan WANG. A Current Sensor Based on the Giant Magnetoresistance Effect: Design and Potential Smart Grid Applications. *Sensors* [online]. 2012, **12**(12), 15520-15541 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.3390/s121115520. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/11/15520/>
- [3] PATEL, ASHABEN. *CURRENT MEASUREMENT IN POWER ELECTRONIC AND MOTOR DRIVE APPLICATIONS – A COMPREHENSIVE STUDY*. Missouri-Rolla, 2007.
- [4] ŠEDO, Jozef. *Zariadenie pre sledovanie frekvenčného spektra prúdu odoberaného meničom v reálnom čase*. Žilina, 2011. Diplomová práca. Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Peter Drgoňa, Ph.D.
- [5] THURBER, W. The Hall Effect. In: *The National Institute of Standards and Technology (NIST)* [online]. b.r. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/engineering-physics-division/hall-effect>
- [6] *Wikipedia: Faraday effect* [online]. b.r. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect
- [7] BOHNERT, Klaus a Peter GUGGENBACH. A revolution in high dc current measurement. *ABB Review* [online]. 2005, **2005**(1), 5 [cit. 2016-12-13]. ISSN 1013-3119. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/5aec632bde4451bfc1256fa50036f47d/06-10%201M500%20ENG%2072dpi.pdf>
- [8] LIEHR, Sascha. *Optical Measurement of Currents in Power Converters*. Stockholm, 2006.
- [9] Fiber Bragg grating. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating

- LELAND, Eli, Christopher SHERMAN, Peter MINOR, Richard WHITE a
 [10] Paul WRIGHT. A new MEMS sensor for AC electric current. *SENSORS* [online]. 2010 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.1109/ICSENS.2010.5690649. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5690649/>
- OLSZEWSKI, Oskar, Ruth HOULIHAN, Rosemary O'KEEFFE, Mike
 [11] O'NEILL, Finbarr WALDRON, Alan MATHEWSON a Nathan JACKSON. A MEMS Silicon-based Piezoelectric AC Current Sensor. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **87**, 1457-1460 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.724. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581402846X>
- ROMAN, Manuel, Guillermo VELASCO, Alfonso CONESA a Felipe
 [12] JEREZ. Low consumption Flux-gate transducer for AC and DC high-current measurement. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference* [online]. IEEE, 2008, , 535-540 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1109/PESC.2008.4591984. ISBN 978-1-4244-1667-7. ISSN 0275-9306. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4591984/>
- JOGSCHIES, Lisa, Daniel KLAAS, Rahel KRUPPE, Johannes
 [13] RITTINGER, Piriya TAPTIMTHONG, Anja WIENECKE, Lutz RISSING a Marc WURZ. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. *Sensors* [online]. 2015, **15**(11), 28665-28689 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.3390/s151128665. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/28665/>
- NICKEL, Janice. Magnetoresistance overview. *HP Labs Technical Reports*
 [14] [online]. 1995, **95**(60), 12 [cit. 2016-12-13].
- VAŇATKA, Marek. *MAGNETICKÉ MULTIVRSTVY PRO APLIKACE VE*
 [15] *SPINTRONICE*. Brno, 2013.
- IKEDA, S., J. HAYAKAWA, Y. ASHIZAWA et al. Tunnel
 [16] magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeBMgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature. *Applied Physics Letters* [online]. 2008, **93**(8), 082508- [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1063/1.2976435. ISSN 00036951. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/93/8/10.1063/1.2976435>
- KIM, Woonchan, Susan LUO, Guo-Quan LU a Khai D.T. NGO Integrated
 [17] current sensor using giant magneto resistive (GMR) field detector for planar power module. *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* [online]. IEEE, 2013, , 2498-2505 [cit. 2016-

12-11]. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520647. ISBN 978-1-4673-4355-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6520647/>

- LOPES, Antonio, Susana CARDOSO, Ricardo FERREIRA et al. MgO
[18] Magnetic Tunnel Junction Electrical Current Sensor With Integrated Ru Thermal Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, **49**(7), 3866-3869 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2246550. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6558990/>

- CARAZO, Afredo Vázques. *NOVEL PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS FOR HIGH VOLTAGE MEASUREMENTS*. Barcelona, 2000. Doctoral Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Vedoucí práce Richard Bosch Totus.

- KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi*. Plzeň, 2013.
[20] Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.

- Electro-Optics. SALEH, Bahaa a Malvin TEICH. *Fundamentals of Photonics (Second Edition)*. 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 1991, s. 696-735. ISBN 0471213748.
[21]

- PAN, Feng, Xia XIAO, Yan XU a Shiyan REN. An Optical AC Voltage
[22] Sensor Based on the Transverse Pockels Effect: the origin, evolution, and impact of doi moi. *Sensors* [online]. 2011, **11**(12), 6593-6602 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.3390/s110706593. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/7/6593/>

- DVOŘÁK, M. *PPMV Instrument transformers: Product presentation*. ABB,
[23] 2008. Dostupné také z: <http://www.cablejoints.co.uk/upload/ABB-MV-Medium-Voltage-Transformers-Presentation.pdf>

- PROCA, V. a N. PADURARU Methods for non-conventional measuring
[24] sensor integration in the medium voltage electrical equipment. *2005 IEEE Russia Power Tech* [online]. IEEE, 2005, , 1-6 [cit. 2016-12-14]. DOI: 10.1109/PTC.2005.4524774. ISBN 978-5-93208-034-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4524774/>

- MINKER, Ruthard a Edmund O. SCHWEITZER III Low Power Voltage and
[25] Current Transducers for Protecting and Measuring Medium and High Voltage Systems. In: *26th Annual Western Protective Relay Conference* [online]. 2000, s. 30 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6095_LowPowerVoltage_Web.pdf?v=20150812-085605

- ABB. *UniGear ZS1: Medium voltage, arc-proof, air insulated switchgear up to 24 kV insulated voltage*. Rev. G, en - Technical catalogue - 2016.01. 2016.
- NVE CORPORATION. *AA/AB-Series Analog Magnetic Sensors*. SB-00-059_RevA. MN 55344-3617 USA, 2017.
- TEXAS INSTRUMENTS. *$\mu A78Mxx$ Positive-Voltage Regulators*. REVISED JANUARY 2015. Dallas, Texas, 2015.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP601/1R/2/3/4*. DS21314G. 2007.

ZOZNAM SKRATIEK

AC	- striedavý prúd (Alternating Current)
AMR	- anizotropná magnetorezistivita (Anisotropic MagnetoResistance)
CIP	- prúd v rovine vzorky (Current In Plane)
CPP	- prúd kolmý na rovinu vzorky (Current Perpendicular to Plane)
DC	- jednosmerný prúd (Direct Current)
DP	- dolná priepusť
FPGA	- programovateľné hradlové pole (Field Programmable Gate Array)
GMR	- obria magnetorezistivita (Giant MagnetoResistance)
HP	- horná priepusť
MEMS	- mikromechanické systémy (Micro-Electro-Mechanical Systems)
MTJ	- magnetický tunelový článok (Magnetic Tunnel Junction)
SOIC	- Small Outline Integrated Circuit
MR	- magneto-rezistívny

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1: Znázornenie jednotlivých prvkov Biot-Savartovho zákona na vodiči s pretekajúcim prúdom. [1]	12
Obr. 2: Znázornenie jednotlivých prvkov integrovaného Biot-Savartovho zákona na vodiči s prúdom.....	13
Obr. 3: Feromagnetické jadro so vzduchovou medzerou so znázornenými jednotlivými označeniami veličín. [2].....	14
Obr. 4: Znázornenie Hallovho javu. [5].....	16
Obr. 5: Hallova sonda v usporiadaní merania v otvorenej slučke. [3].....	17
Obr. 6: Hysteréza krivka merania senzora s Hallovou sondou v otvorenej slučke. [3]	18
Obr. 7: Hallova sonda v usporiadaní merania v uzavretej slučke. [3]	19
Obr. 8: Znázornenie rotácie polarizovanej elektromagnetickej vlny po prechode magnetooptickým materiálom. [6].....	21
Obr. 9: Znázornenie základných tvarov senzorov z magnetooptického materiálu používaných pre meranie prúdu. Šedý kruh je prierez vodiča s meraným prúdom, prerušovaná čiara znázorňuje svetelný lúč a jeho odrazy v materiáli. [8]	23
Obr. 10: Optické vlákno s Braggovou mriežkou so znázornenými rôznymi indexami lomu vo vlákne. [9]	23
Obr. 11: Znázornenie rozťažnosti jednotlivých materiálov a) v magnetickom poli, a b) mimo magnetického poľa, a posun spektra vplyvom rozťažnosti. [8]	24
Obr. 12: MEMS jazýček s naneseným magnetickým materiálom na jeho voľnom konci. [10]	25
Obr. 13: Schematické znázornenie princípu flux gate senzora. [3]	27
Obr. 14: Závislosť permeability feromagnetického materiálu a magnetickej indukcie na veľkosti magnetického poľa. [3]	28
Obr. 15: Zobrazenie časových priebehov výstupného prúdu saturačnej cievky v závislosti na vonkajších podmienkach magnetickej indukcie. [3]	28
Obr. 16: Časový priebeh prúdovej odozvy saturačnej cievky na obdĺžnikový signál, a) bez vykompenzovanej magnetickej indukcie, a b) s vykompenzovanou magnetickou indukciou. [3]	29
Obr. 17: Závislosť rezistivity Fe-Cr článku na veľkosti magnetického poľa. [15]	32

Obr. 18: Usporiadanie prúdovodnej cesty v GMR článkoch, a) CIP, b) CPP. [15]	33
Obr. 19: Znázornenie usporiadanie MTJ. [15]	33
Obr. 20: Znázornenie zapojenia GMR rezistorov do Wheatsonovho mostíka s odtienenými rezistormi R_2 a R_4 . [17]	34
Obr. 21: GMR senzor umiestnený vo vzduchovej medzere feromagnetického koncentrátora s navinutým sekundárnym vinutím. [2]	35
Obr. 22: Usporiadanie TJM rezistorov a prúdovodnej dráhy na prúdovom senzore. [18]	36
Obr. 23: Schematické znázornenie usporiadania a prevádzky piezoelektrického napäťového transformátora. [19]	38
Obr. 24: Budič zostavený z 12 diskov PZT-8 piezoelektrického materiálu. [19]	39
Obr. 25: Graf závislosti vstupnej a výstupnej hodnoty napätia s vyobrazenými hodnotami mechanického predpätia [19]	40
Obr. 26: Transformátor počas testovania. [19]	40
Obr. 27: Zloženie transformátora. [19]	41
Obr. 28: Elektrooptický materiál s vyznačenými kryštalografickými rovinami a vyobrazenými osami. [22]	42
Obr. 29: Schematické zapojenie optického napäťového senzora. [19]	43
Obr. 30: Znázornenie usporiadania reálneho optického napäťového senzora. [22]	44
Obr. 31: Blokový diagram obvodu spracovania signálu. [22]	44
Obr. 32: Všeobecné znázornenie napäťového deliča pomocou impedancií.	45
Obr. 33: Napäťový delič. [25]	47
Obr. 34: Náhradný obvod rezistívneho deliča. [25]	48
Obr. 35: Zobrazenie jednotlivých častí rozvádzača UniGear ZS1. A) vypínačový priestor, B) prípojnícový priestor, C) kábový priestor, D) nízkonapäťová časť, E) Odfukový kanál pre odvod plynov vzniknutých pri výboji. [26]	52
Obr. 36: Simulácia magnetického poľa v okolí medeného vodiča s priečnym prierezom 10 x 80 mm. Vodičom prechádza prúd o veľkosti 500 A.	54
Obr. 37: Simulácia magnetického poľa v okolí zdvojených medených vodičov, každý o rozmeroch priečného prierezu 10 x 80 mm. Vzduchová medzera medzi pásmi je 1 mm. Každým z vodičov prechádza prúd o veľkosti 250 A.	55
Obr. 38: Výsledky výpočtu a simulácií veľkosti magnetickej indukcie v závislosti na šírke medeného pásu.	56

Obr. 39: Závislosť veľkosti magnetickej indukcie na prúde pretekajúcom vodičom, v rôznych vzdialenostiach od vodiča.	58
Obr. 40: 1) Znázornenie smeru citlivosti súčiastky na vektor magnetického poľa, vyznačený šípkami a symbolom magnetickej indukcie B. 2) Znázornenie umiestnenia senzora na DPS nad vodičom, cez ktorý preteká prúd. Prúd vytvára magnetické pole znázornené kruhovými prerušovanými čiarami okolo vodiča.	60
Obr. 41: Elektrická schéma obvodu prúdového senzora.	62
Obr. 42: DPS senzora s osadenými súčiastkami.	63
Obr. 43: Zjednodušená schéma zapojenia meracej sústavy.	64
Obr. 44: Zobrazenie meracieho zázemia. Na obrázku je možné vidieť medenú tyč nad ktorou sa nachádzajú senzory, prúdový transformátor (napravo) a normálový transformátor (naľavo).	65
Obr. 45: Detail uchytenia senzorov nad medenou tyčou.	66
Obr. 46: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde I_{rms}	67
Obr. 47: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde I_{rms}	67
Obr. 48: Výstupná charakteristika prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.	68
Obr. 49: Lineárna časť výstupnej charakteristiky prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.	69
Obr. 50: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde I_{rms}	72
Obr. 51: Priebeh výstupu prúdovej sondy a prúdových senzorov pri primárnom prúde I_{rms}	73
Obr. 52: Výstupná charakteristika prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.	73
Obr. 53: Lineárna časť výstupnej charakteristiky prúdových senzorov v závislosti na primárnom prúde.	74
Obr. 54: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora A005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	79

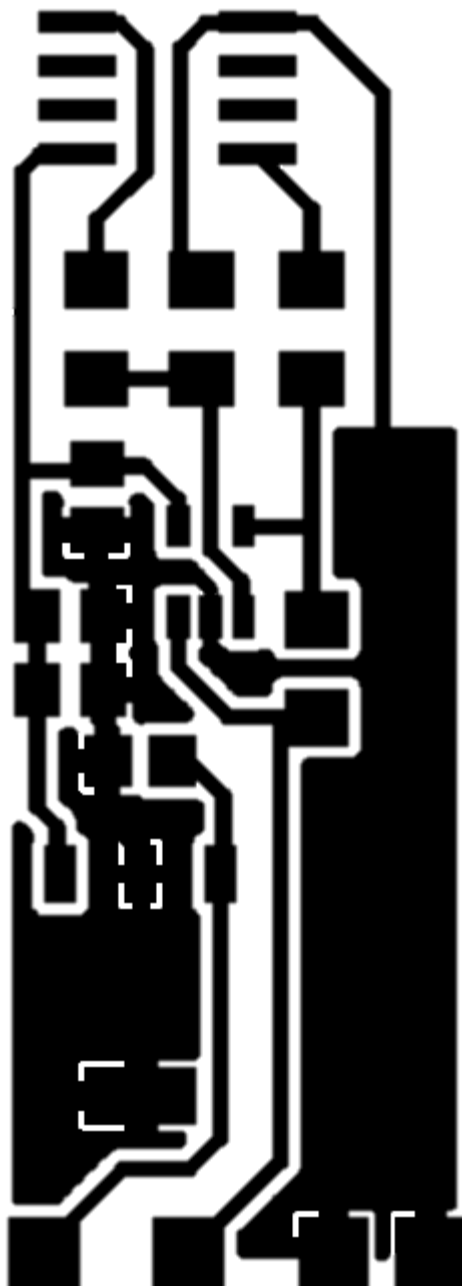
Obr. 55: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora A003 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	79
Obr. 56: prúdový senzor ABB KECA 80, ktorého tvar je možné využiť aj pre magnetorezistívny senzor.....	80
Obr. 57: Šablóna pre výrobu DPS senzora.	95
Obr. 58: Rozmiestnenie súčiastok na DPS.	96
Obr. 59: Šablóna pre nanášanie spájkovacej pasty.	97
Obr. 60: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.	99
Obr. 61: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.	100
Obr. 62: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA003 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.	100
Obr. 63: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.	101
Obr. 64: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.	101
Obr. 65: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA003 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.	102
Obr. 66: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	102
Obr. 67: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	103
Obr. 68: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA003 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	103
Obr. 69: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča, pre rôzne	

vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.	104
---	-----

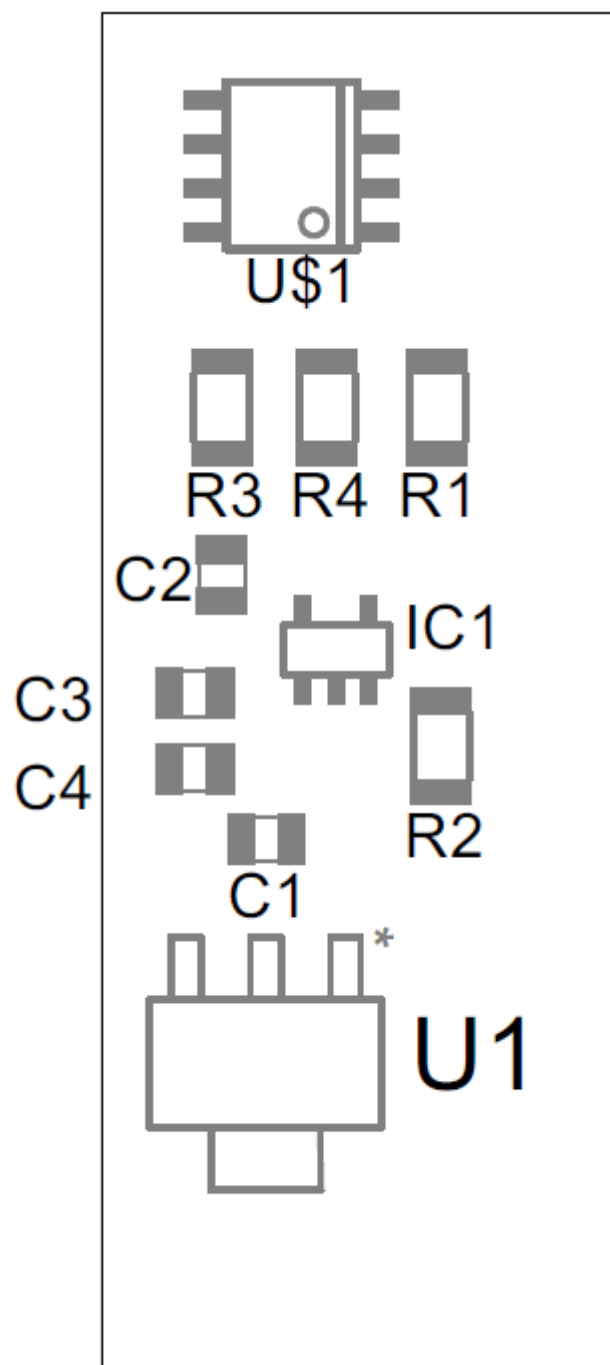
ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Vlastnosti prúdových senzorov. [2].....	49
Tab. 2: Menovité prúdy vysokonapäťových rozvádzačov ABB UniGear ZS1. [26]	53
Tab. 3: Hodnoty maximálneho prúdu a napätia vzťahujúce sa k rozmeru senzora – vzdialenosti stredu vodiča od snímacej časti.	57
Tab. 4: Parametre vybratých magnetosenzorov. [27]	59
Tab. 5: Maximálne výstupné napätie magnetorezistívnej súčiastky pri vstupnom napätí 3,3 V respektíve 5 V.	61
Tab. 6: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.	70
Tab. 7: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča.	70
Tab. 8: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA003, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.	71
Tab. 9 Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.	75
Tab. 10: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA005, umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča.	75
Tab. 11: Merané a vypočítané hodnoty pre prúdový senzor so súčiastkou AA003, umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča.	76
Tab. 12: Vypočítaná citlivosť MR súčiastok.	78
Tab. 13: Hodnoty rozsahu kombinácie senzorov pre zaužívané vzdialenosti umiestnenia od stredu vodiča.	80
Tab. 14: Zoznam súčiastok pre vyhotovenie senzora.	98
Tab. 15: Zoznam prúdov, v ktorých bolo zamýšľané merať vlastnosti senzora, a zároveň prúdy ktoré boli pri meraní nastavené.	98

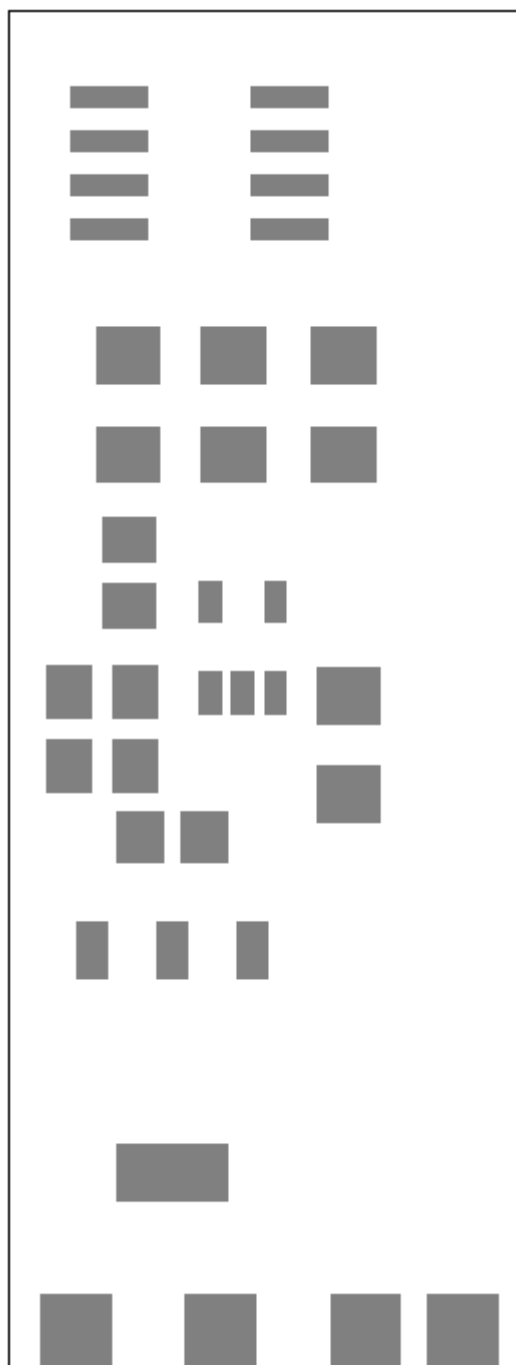
PRÍLOHA 1



Obr. 57: Šablóna pre výrobu DPS senzora.



Obr. 58: Rozmiestnenie súčiastok na DPS.



Obr. 59: Šablóna pre nanášanie spájkovacej pasty.

Tab. 14: Zoznam súčiastok pre vyhotovenie senzora.

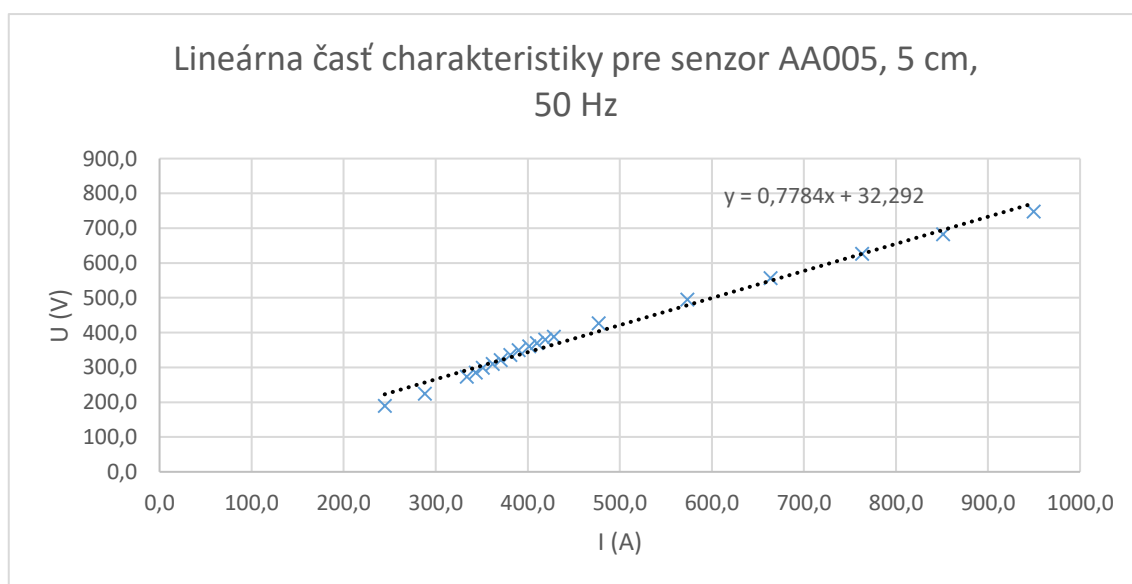
Súčiastka	Hodnota	Puzdro	Poznámka
C1	330n	C0805	
C2	100n	C0805	
C3	1u	C0805	
C4	100n	C0805	
IC1	MCP601OT	SOT23-5	Operačný zosilňovač
R1	270k	R1206	
R2	2,7M	R1206	
R3	270k	R1206	
R4	2,7M	R1206	
U\$1	AA003/5-02E	SOIC8	MR súčiastka
U1	UA78M33C	SOT223	Napäťový stabilizátor

PRÍLOHA 2

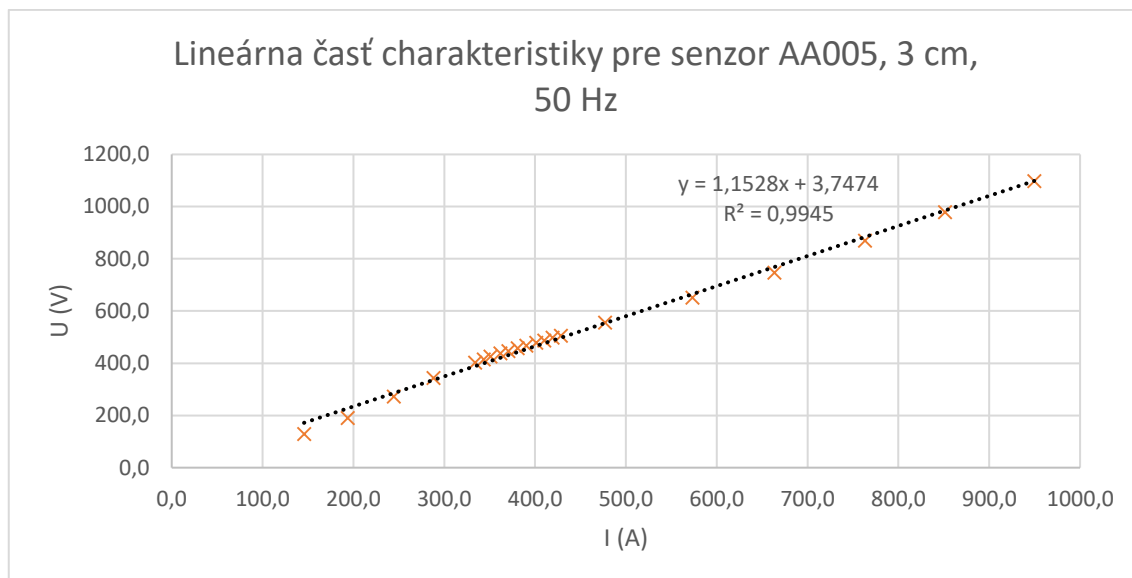
Tab. 15: Zoznam prúdov, v ktorých bolo zamýšľané merať vlastnosti senzora, a zároveň prúdy ktoré boli pri meraní nastavené.

I plánovaný 50-60 Hz (A)	I nastavený 50 Hz (A)	I nastavený 60 Hz (A)
0,0	0,0	8,6
10,0	10,9	12,6
20,0	18,1	22,6
30,0	29,2	30,6
40,0	39,8	39,9
50,0	50,4	49,8
60,0	60,0	58,1
70,0	68,8	67,5
80,0	78,2	79,0
90,0	90,3	87,8
100,0	100,5	96,3
110,0	104,0	107,6
120,0	114,6	117,2
130,0	125,6	125,4
140,0	134,7	134,1
150,0	145,7	146,6
200,0	193,8	193,1

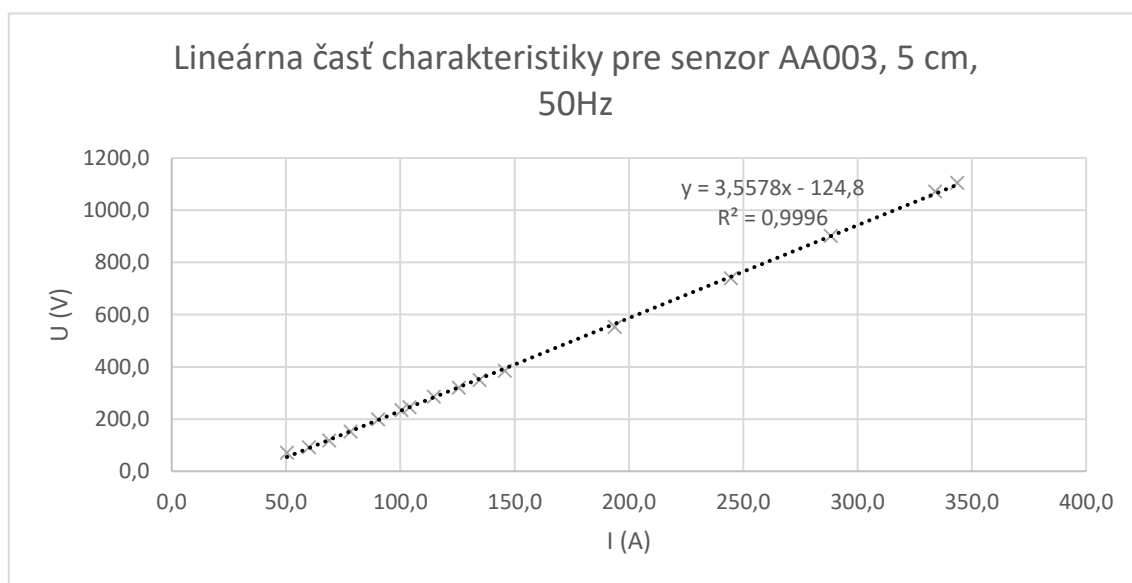
250,0	244,6	239,0
300,0	288,2	286,2
350,0	333,9	335,6
360,0	343,6	342,9
370,0	351,0	352,8
380,0	361,9	362,2
390,0	370,6	371,1
400,0	381,0	382,6
410,0	390,2	391,6
420,0	401,4	400,1
430,0	410,0	409,3
440,0	419,1	419,6
450,0	428,5	429,4
500,0	477,1	477,1
600,0	573,2	573,2
700,0	663,6	651,9
800,0	763,3	763,8
900,0	851,3	811,8
1000,0	949,5	-----



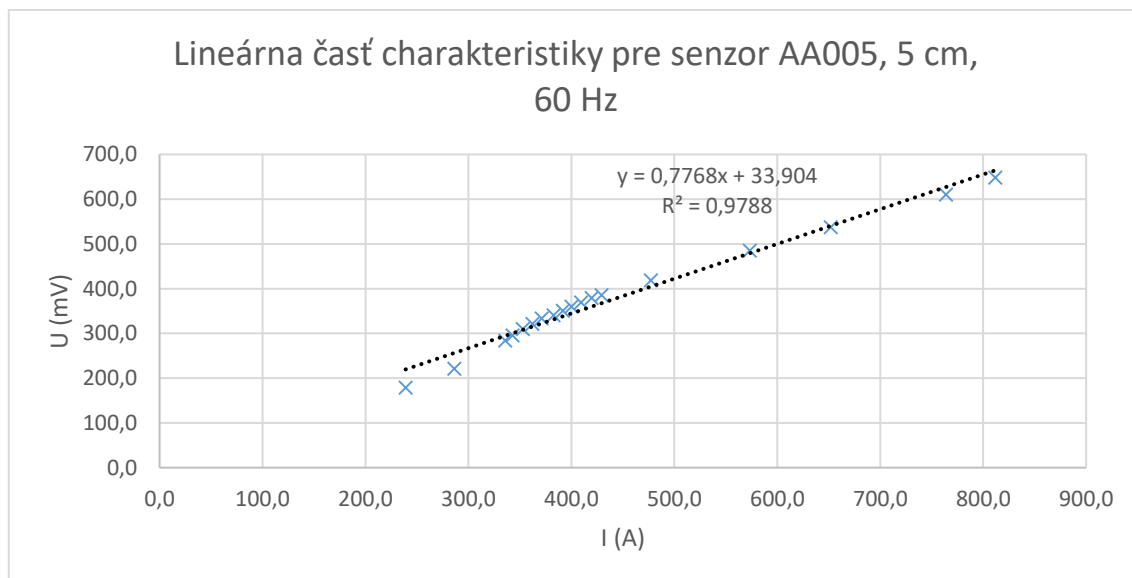
Obr. 60: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.



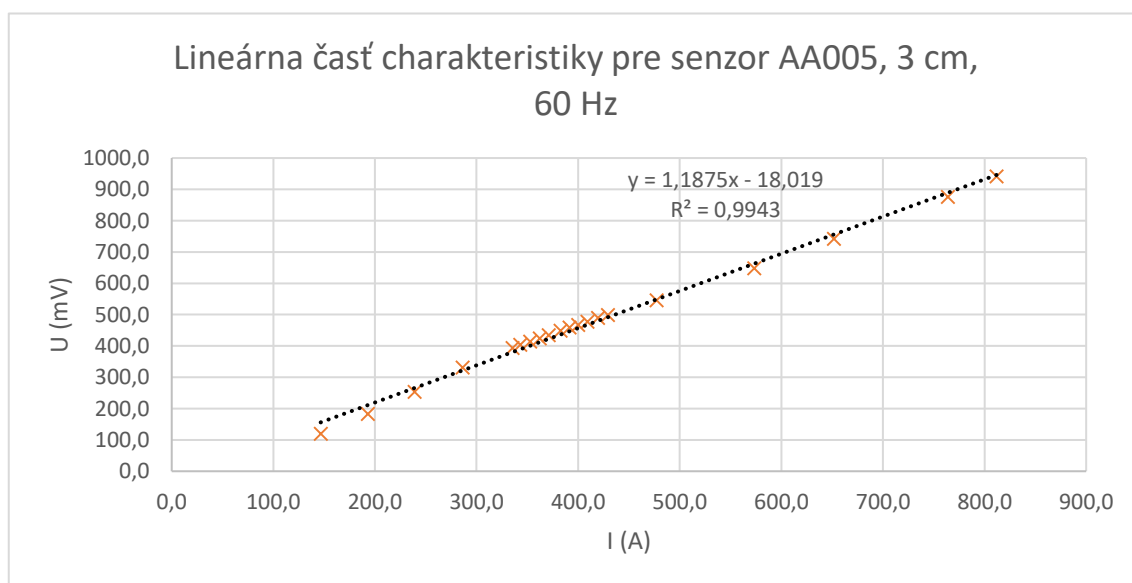
Obr. 61: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.



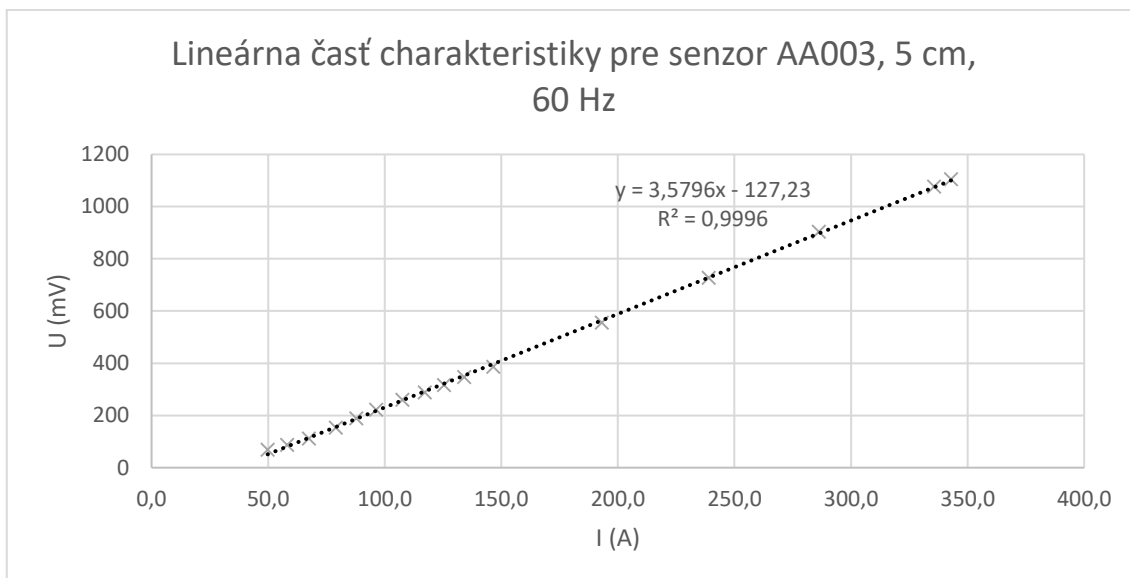
Obr. 62: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA003 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 50 Hz.



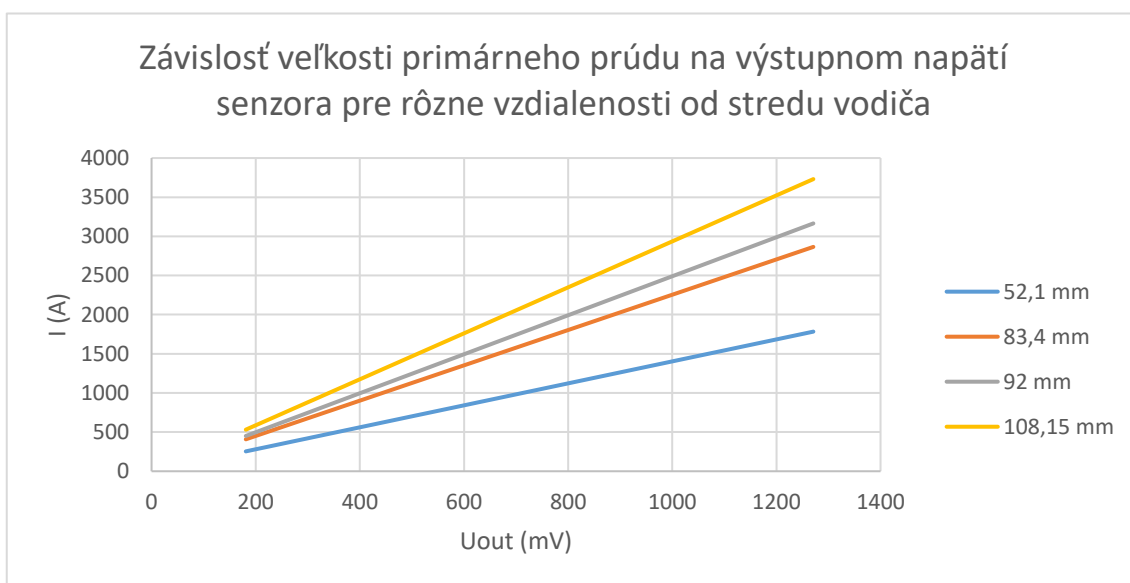
Obr. 63: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.



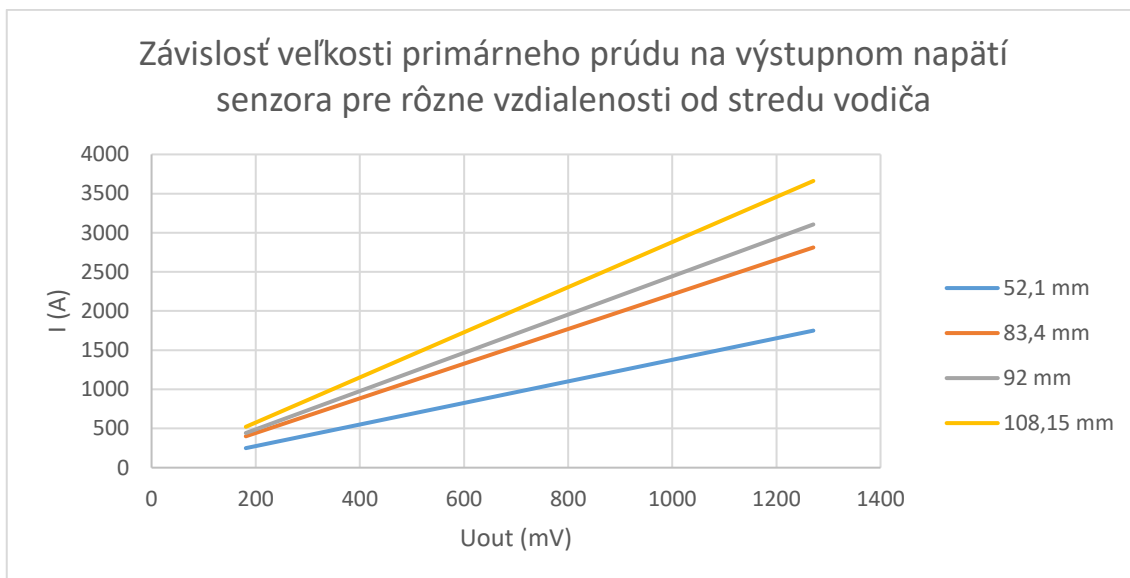
Obr. 64: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA005 umiestnený do vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.



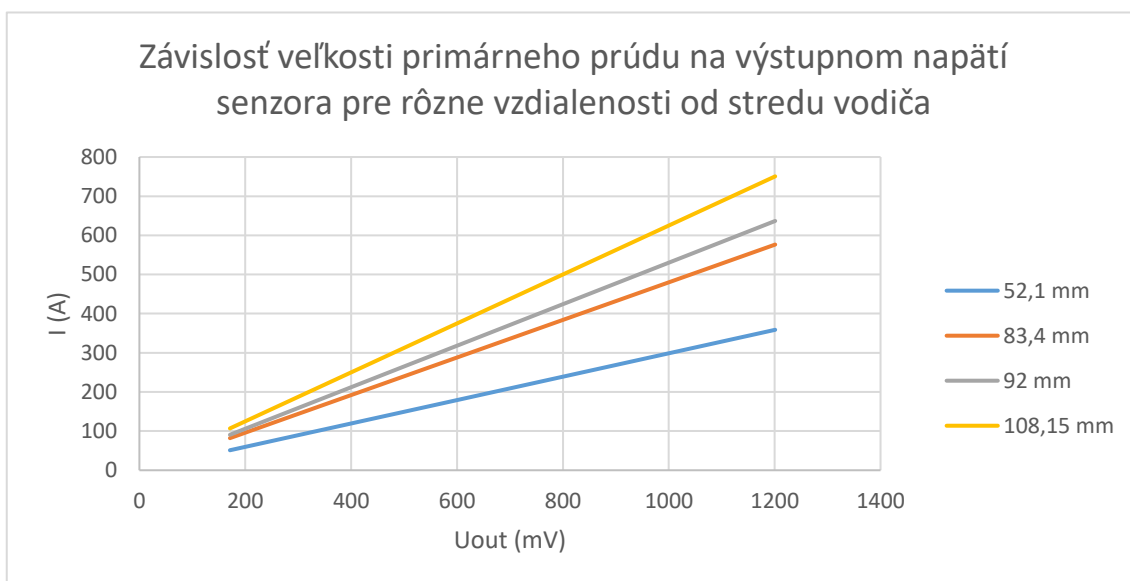
Obr. 65: Lineárna časť charakteristiky pre senzor AA003 umiestnený do vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča pri meraní veľkosti prúdu o frekvencii 60 Hz.



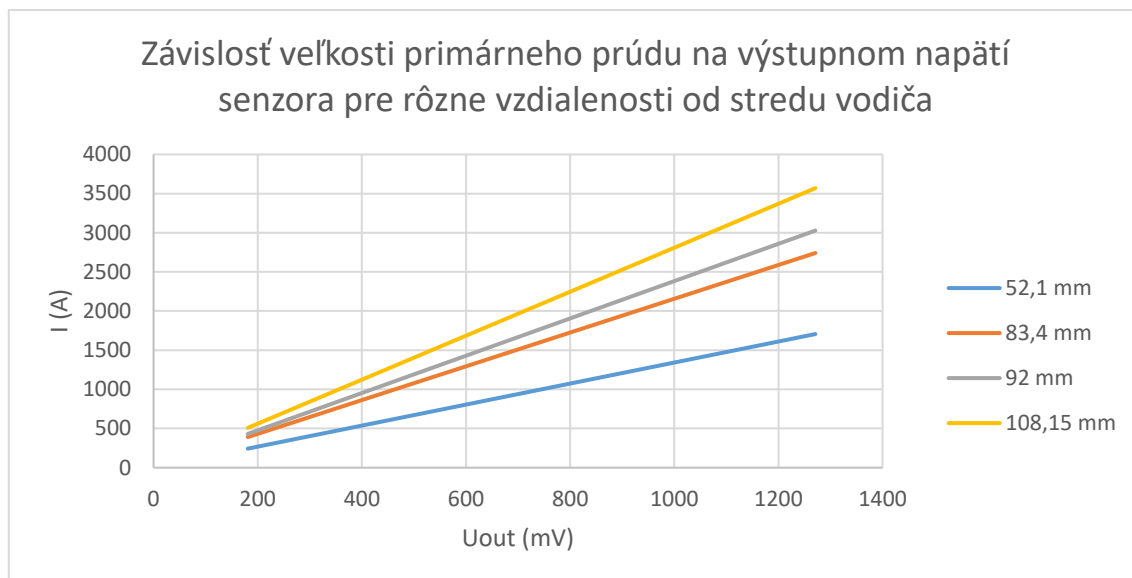
Obr. 66: Závislosť veľkosti primárneho prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.



Obr. 67: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.



Obr. 68: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA003 použitého pri meraní vo vzdialenosti 5 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.



Obr. 69: Závislosť veľkosti primárneho 60 Hz prúdu na výstupnom napätí senzora AA005 použitého pri meraní vo vzdialenosti 3 cm od stredu vodiča, pre rôzne vzdialenosti od stredu vodiča. Jednotlivé krivky sú zobrazené v lineárnej časti priebehu senzora.